



RESEARCH / COLD STORAGE / TP 400 KVA

# Исследование эффективности компенсации реактивной мощности на холодильном складе

---

## Ключевой результат

TG Ф

**0.77 -> 0.17**

Нормативный режим

ТОК P95

**632 А -> 437 А**

-31%

>630 А

**2452 мин -> 0**

Превышения устранены

ЭКОНОМИКА

**~310 тыс. руб/мес**

~3.7 млн руб/год

# Дорожная карта исследования (CRISP-DM)

## • Business Understanding

- Зафиксированы эксплуатационные жалобы: отключения, перегрев распределительных устройств, работа вводного автомата в зоне высоких токов.
- Цель исследования: снизить технические риски, высвободить мощность трансформатора, обеспечить норматив по tg φ и оценить экономический эффект.
- Логика анализа: токовая нагрузка -> tg φ -> компенсация реактивной мощности -> снижение токов, потерь и затрат.

## • Data Understanding

- Выполнен контроль качества минутных рядов P, Q, U, T.
- Построены профили нагрузки; зафиксированы tg φ ≈ 0.77, токи вблизи номинала 630 А и регулярные эпизоды выше 630 А.
- Рабочая инженерная гипотеза: ключевой вклад в перегрузку дает избыточная реактивная составляющая.

## • Data Preparation

- Минутные данные агрегированы в часовые медианы для сопоставимых графиков и моделей.
- Сформированы расчетные признаки: tg φ = Q/P, ток I = f(P,Q,U), температура с лагом +2 ч.
- Периоды размечены как **before/after** относительно момента включения УКРМ: 01.08.2024 12:00.

## • Modeling

- Построены baseline-модели июля и три контрфактических сценария:
- `naive_hod`: усреднение по часам суток.
- `match_temp`: матчинг по температуре и часу суток.
- `reg_temp`: OLS-регрессия  $P \sim T(+2ч) + \text{суточный цикл}$ .
- Методы используются для отделения эффекта компенсации от погодных факторов.

## • Evaluation

- Сравнение «июль vs август» показывает снижение tg φ с ~0.77 до ~0.17 и снижение p95 тока с ~632 А до ~437 А.
- Эпизоды превышения 630 А после включения УКРМ в анализируемом периоде не зафиксированы.

- Экономия активной энергии оценивается в  $\approx 22$  МВт·ч/мес, или  $\approx 310$  тыс. руб/мес при тарифе 13.85 руб/кВт·ч.
- Расхождение между `match_temp` и `reg_temp` менее 1 %, поэтому итоговая оценка устойчива к способу погодной коррекции.
- **Deployment / Next Steps**
  - Рекомендуется операционный мониторинг tg  $\phi$ , токов и загрузки трансформатора.
  - Результаты пригодны для управленческой отчетности и обоснования дальнейших технических мероприятий.
  - Следующий шаг: rolling-валидация baseline на осенне-зимнем периоде и автоматизация регулярного отчета.
  - Финансовая оценка: годовой эффект порядка 269 МВт·ч или 3.7 млн руб; расчет окупаемости выполняется на основании фактической стоимости внедрения.

# Business Understanding — постановка задачи

## Первичный запрос клиента

На холодильном складе фиксируются высокие расходы на электроэнергию и повторяющиеся эксплуатационные проблемы: перегревы, отключения автоматов и неустойчивый режим работы сети. Требуется определить причины, подготовить технически обоснованное решение и оценить экономический эффект.

## Ключевые признаки проблемы

- **Высокие затраты на электроэнергию** -> требуется анализ профиля нагрузки, тарифной базы и режимов работы оборудования.
- **Перегревы и отключения автоматов** -> необходимо проверить токовые пики, tg φ, напряжение и возможные перегрузки линий.
- **Разделенная эксплуатация электрики и холодильного оборудования** -> данные и ответственность распределены между несколькими группами, что затрудняет поиск причины.
- **Отсутствие непрерывного мониторинга** -> эксплуатация реагирует на уже произошедшие события, а не на ранние признаки перегрузки.
- **Доступность данных от клиента** -> можно построить измерительный baseline и проверить гипотезы количественно.

## Декомпозиция задач

| № | Блок задачи                      | Запрос бизнеса  | Техническая трактовка   | Данные / действия                          |
|---|----------------------------------|---|---|--|
| 1 | Анализ энергопотребления         | Снизить расходы   | Построить baseline активной и реактивной мощности, проверить тарифные предпосылки | История P, Q, тарифы                       |
| 2 | Диагностика аварийных режимов    | Устранить перегревы и отключения                          | Выявить пики тока, tg φ, просадки напряжения и длительность перегрузок            | Ряды P/Q/U, журналы ремонтов               |
| 3 | Контроль и мониторинг            | Видеть состояние объекта до аварии                        | Организовать непрерывный технический учет и регулярную аналитику                  | Счетчики, узел учета, телеметрия           |
| 4 | Согласование зон ответственности | Связать режимы холодильного и электрического оборудования | Объединить данные в единую аналитическую модель                                   | Общая система учета и отчетности           |
| 5 | Оптимизация и прогноз            | Обосновать дальнейшие действия                            | Рассчитать эффект УКРМ, потенциал энергосбережения и прогноз пиковых нагрузок     | Модели baseline, сценарии, контрольные KPI |

## Критерии успеха

- Снижение активного энергопотребления не менее чем на **10-15 %** при сохранении технологической функции склада.
- Исключение эпизодов тока выше номинала вводного автомата **630 А** в нормальном режиме работы.
- Стабилизация коэффициента мощности на уровне **PF >= 0.98** или **tg φ ≈ 0.20**.
- Наличие минутного профиля нагрузки, напряжения и температуры для воспроизводимого анализа.
- Регулярный отчет для руководства и эксплуатационный мониторинг для технической службы.

## Первичный аудит объекта

После получения запроса выполнено обследование объекта. Задача этапа — зафиксировать исходные условия, определить основные группы потребителей, проверить состояние распределительного оборудования и выбрать точки для последующего мониторинга.

## Описание объекта

- **Тип объекта:** холодильное предприятие на территории бывшего промышленного завода 1950-х годов постройки.
  - **Электроснабжение:** трансформаторная подстанция 10/0,4 кВ, мощность 400 кВА.
  - **Учет электроэнергии:** коммерческий учет ведется на стороне 0,4 кВ.
  - **Схема питания:**
    - от ТП по кабельной линии около 200 м запитан главный распределительный щит (ГРЩ);
    - от ГРЩ отходят линии на холодильные установки длиной около 50-80 м.
- 

## Результаты обследования

- **Тепловизионный контроль:**
    - внутри распределительных щитов зафиксирован нагрев до **100+ °С**;
    - кабельные линии работали на уровне **70-80 %** от допустимой нагрузки;
    - на концах линии наблюдалось снижение напряжения до **347 В** при 400 В на вводе.
  - **Ручные замеры качества электроэнергии:**
    - проведены измерения холодильных установок по таблице замеров до компенсации;
    - зафиксированы низкий коэффициент мощности и выраженные пики реактивной нагрузки.
- 

## Решения по дальнейшему исследованию

- Установить **узел технического учета** на стороне ТП рядом с коммерческим учетом.
  - Сбирать данные с дискретностью **1 минута** для анализа пиков и длительности перегрузок.
  - Добавить в анализ данные о **температуре наружного воздуха**, чтобы отделить эффект погодной нагрузки от электротехнических факторов.
-

✅ Исходное обследование подтвердило высокую токовую нагрузку, перегрев распределительных устройств и признаки потерь в кабельных линиях. Следующий шаг — формирование baseline-профиля до включения компенсации.

## 2 CRISP-DM · Data Understanding — Июль 2024 (baseline без допущений)

**Цель этапа.** Понять поведение объекта «как есть» на июльских данных без предположений о решениях. Зафиксировать закономерности и проблемы, которые потом проверим и количественно оценим.

**Датасет.** `telemeta_45_m236pq_gsm_jul24.csv`, шаг 1 мин. **Поля для этого этапа:** `time`, `active_power_kw` (P), `reactive_power_kvar` (Q), `outside_temp_c` (T). \*  
(Напряжение и ток оставляем за рамками этого шага; вернём их позже в Data Preparation/Modeling.)\*

---

### Вопросы, на которые отвечаем в этом разделе

- **Профиль нагрузки:** как распределяются P и Q по суткам/неделям? Есть ли стабильная суточная цикличность?
  - **Пики и «хвосты»:** каковы p95/p99/максимумы по P и Q, и как часто/долго длятся эпизоды пиков?
  - **Температурная чувствительность:** есть ли зависимость P от T, и какой **лаг L ∈ [-6; +6] часов** максимизирует корреляцию?
  - **Индикатор режима:** как ведёт себя отношение  **$tg\phi = Q/P$**  (как описательная метрика нагрузки), без интерпретаций и выводов на этом шаге.
  - **Сезонно-суточные компоненты:** наблюдаются ли выраженные колебания «день/ночь» и недельный паттерн.
- 

### Что делаем (пошагово)

- QC минутной серии: равномерность 1 мин, отсутствие пропусков/дубликатов по `time`, диапазоны P/Q/T.
- Формируем **рабочее представление:** оставляем `P`, `Q`, `T`; строим часовые агрегации для графиков (min/mean/max, p95).
- Визуализируем:
- P(t), Q(t) с наложением T(t) (разные шкалы/агрегации для читаемости).
- Скаттер **P ~ T** и серия скаттеров **P ~ T\_shift(L)** для L ∈ [-6;+6] с расчётом Pearson/Spearman.
- Считаем метрики:
- `P_mean`, `P_p95`, `P_p99`, `P_max`, аналогично для Q.
- Эпизоды «пиков» по порогам (например, p95/p99): количество, суммарная длительность, максимальная непрерывная.

- `tgφ` как описательный показатель (распределение, квартильные значения).

## Выход этого этапа (артефакты)

- Компактные таблицы статистик по P/Q (минутные и часовые), графики профилей и скаттеры P↔T.
- Оценка температурного лага  $L^*$ , наклон  $dP/dT$  (кВт/°C) и сила связи ( $r_{\text{Pearson}}$ ,  $r_{\text{Spearman}}$ ).
- Черновой перечень гипотез для следующего шага (Data Preparation/Modeling), **без** принятия решений о вмешательствах.

Примечание: на данном этапе **ничего не «лечим» и не предлагаем**, только описываем и количественно подтверждаем наблюдения по июльскому baseline.

## 2.1 · Data Understanding — инспекция входного файла (без преобразований)

**Задача.** Надёжно найти июльский CSV, считать его «как есть» и зафиксировать базовые атрибуты набора данных: список колонок, пример первых строк, размерность, эвристически обнаруженную колонку времени.

### Выход.

- `head(5)` — первые 5 строк без каких-либо преобразований.
- `summary` — словарь с путём, формой, перечнем колонок и детектированной временной колонкой.

## 2.2 · Data Understanding — результаты первичной инспекции

- Загружен файл: `data/telemetry_45_m236pq_gsm_jul24.csv`.
- Размерность: **44 640 строк × 7 колонок** (минутные данные за июль 2024).
- Автоматически определена временная колонка: `time`.
- Основные поля:
- `active_power_kw` — активная мощность (кВт),
- `reactive_power_kvar` — реактивная мощность (кВАр),

- `outside_temp_c` — температура наружного воздуха (°C),
- `apparent_power_kva`, `power_factor`, `voltage_v` — дополнительные инженерные показатели.

✓ Датасет читается корректно, временной ряд полный и готов к дальнейшему качественному контролю (QC).

## 2.3 · Data Understanding — подготовка рабочего представления + QC

**Цель.** Сформировать чистое рабочее подмножество данных для июля (только P, Q, T) и проверить его качество:

- временная колонка в формате `datetime`;
- сортировка и удаление дубликатов;
- контроль пропусков;
- оценка равномерности дискретизации (ожидаем шаг 1 минута, без дыр);
- первичные средние значения по активной/реактивной мощности и температуре.

### Выход.

- Словарь с QC-показателями: количество строк, ожидаемое количество строк, число пропусков, диапазон дат, равномерность шага.
- Первые строки подготовленного датафрейма.

## 2.4 · Data Understanding — проверка рабочего представления июля

### Что проверили:

- Количество строк: **44 640**, полностью совпадает с ожидаемым для минутной дискретности (31 день × 24 ч × 60 мин).
- Пропуски: отсутствуют (`time`, P, Q, T заполнены).
- Шаг времени: строго равномерный (1 минута, без разрывов).
- Диапазон: 01.07.2024 00:00 — 31.07.2024 23:59.
- Средние значения:
- **Активная мощность P:** ~280 кВт

- **Реактивная мощность Q:** ~217 кВАр
- **Температура T:** ~26.1 °C

### **Промежуточный вывод:**

- Датасет июля чистый и готов к последующему исследованию.
- Уже на этапе QC фиксируем: нагрузка объекта держится в сотнях кВт, при этом реактивная мощность велика ( $Q/P \sim 0.77$ ), что указывает на избыточную реактивку и высокие токи.
- Следующим шагом станет **визуализация профилей P, Q и T** для выявления закономерностей.

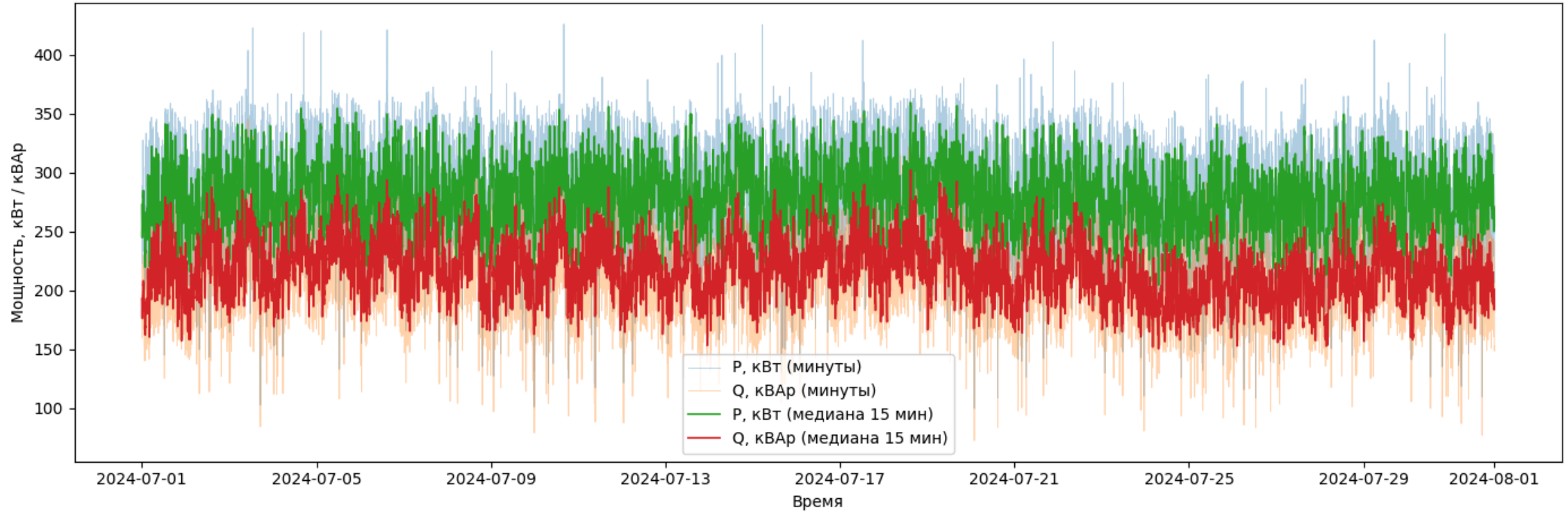
## **2.5 · Data Understanding — профиль июля: P и Q во времени**

**Задача.** Показать динамику активной (P) и реактивной (Q) мощности на минутной дискретности и сгладить профиль **медианой по 15 минут**, чтобы визуально выделить суточные паттерны и пики.

### **Выход.**

- График `july_profile_PQ.png` в `reports/figs/` с четырьмя линиями: P(Q) поминутно и P(Q) со сглаживанием 15 минут.
- Отрисовка в ноутбуке для быстрой проверки.

Июль 2024: профиль активной и реактивной мощности



2.5 · DATA UNDERSTANDING — ПРОФИЛЬ ИЮЛЯ: P И Q ВО ВРЕМЕНИ

## 2.6 · Data Understanding — результаты визуализации профиля июля

- **Активная мощность (P)** держится преимущественно в диапазоне ~240–340 кВт; выражена суточная цикличность с «зубчатостью».
- **Реактивная мощность (Q)** стабильно высока (~180–250 кВАр) и близко повторяет форму P → низкий коэффициент мощности ( $\text{tg } \varphi \sim 0.7\text{--}0.8$ ).

- Сглаживание **медианой 15 минут** делает суточные паттерны читаемыми, не «срезая» пики.

✓ Далее переходим к проверке **температурной чувствительности**: визуальное наложение **P vs T** на часовом ряду (T — красным).

## 2.7 · Data Understanding — P vs T (агрегация 1 час, температура красным)

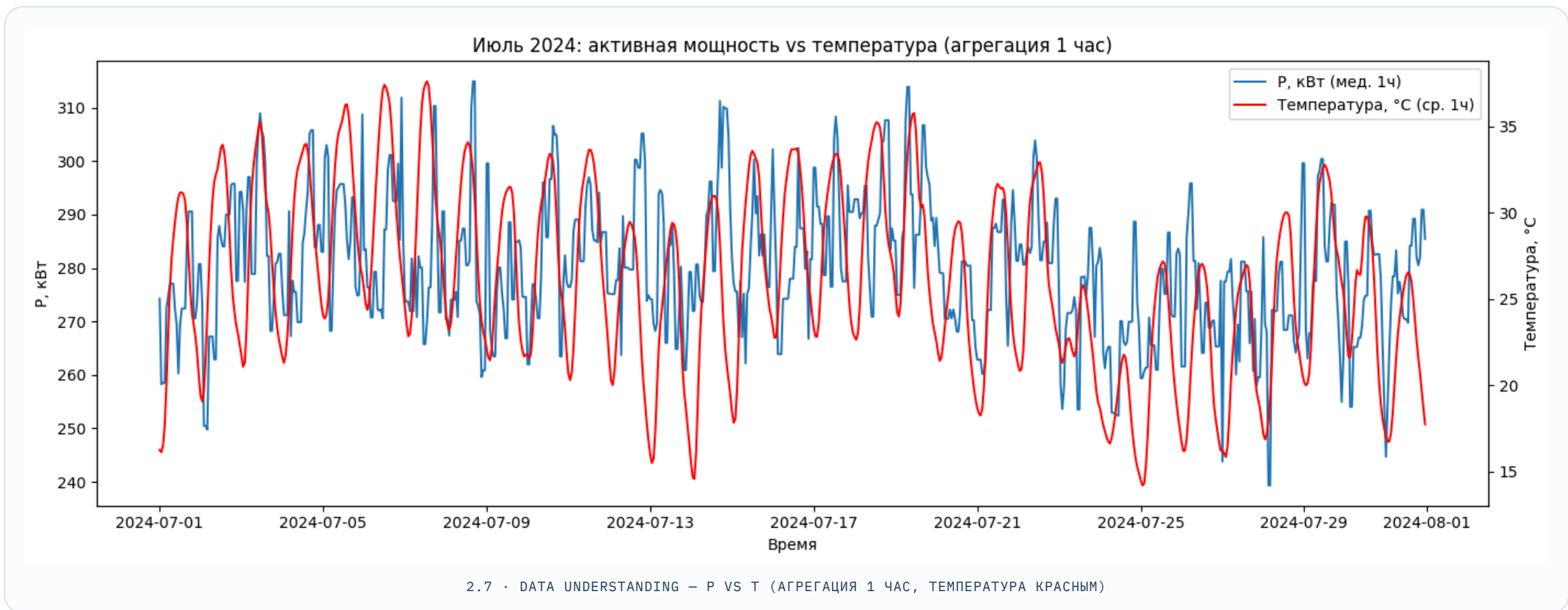
**Цель.** Сопоставить почасовую активную мощность и наружную температуру на одном графике, чтобы визуально оценить их согласованность и первичные метрики корреляции.

### Метод.

- Агрегация по часу: **P** — **медиана 1ч**, **T** — **среднее 1ч**.
- Лёгкое сглаживание: окно 3 часа (медиана для **P**, среднее для **T**) — только для визуальной читабельности.
- Краткий расчёт корреляций: без лага и с лагом **T(+2ч)** (температура опережает нагрузку).

### Выход.

- График `july_P_vs_T_1h.png` в `reports/figs/`.
- Печать `pearson_no_lag` и `pearson_T_plus2h` для быстрой ориентировки.



## 2.8 · Data Understanding – наблюдения по P vs T (1ч)

- Часовые ряды **P** (активная мощность) и **T** (наружная температура) демонстрируют **согласованные траектории**: рост температуры сопровождается ростом нагрузки.
- Быстрые метрики показывают:

- `pearson_no_lag ≈ 0.41` — умеренная положительная корреляция без сдвига,
- `pearson_T_plus2h ≈ 0.48` — корреляция выше при лаге **+2 часа**.
- Это указывает на то, что **нагрузка реагирует на температуру с задержкой порядка 2 часов**, что логично для холодильных установок с тепловой инерцией и управляющими алгоритмами.
- Дальнейший шаг: **сканирование по лагам** для формализации этой гипотезы и оценка наклона зависимости **dP/dT (кВт/°C)**.

## 2.9 · Data Understanding — скаттер P vs T (1ч) + линейный тренд

**Цель.** Квантовать «на глаз» замеченную температурную чувствительность: построить скаттер **P ~ T** на часовом ряду, посчитать **Pearson/Spearman**, оценить наклон **dP/dT (кВт/°C)** простой линейной аппроксимацией. \*(Здесь без лага; лаг проверим отдельной ячейкой.)\*

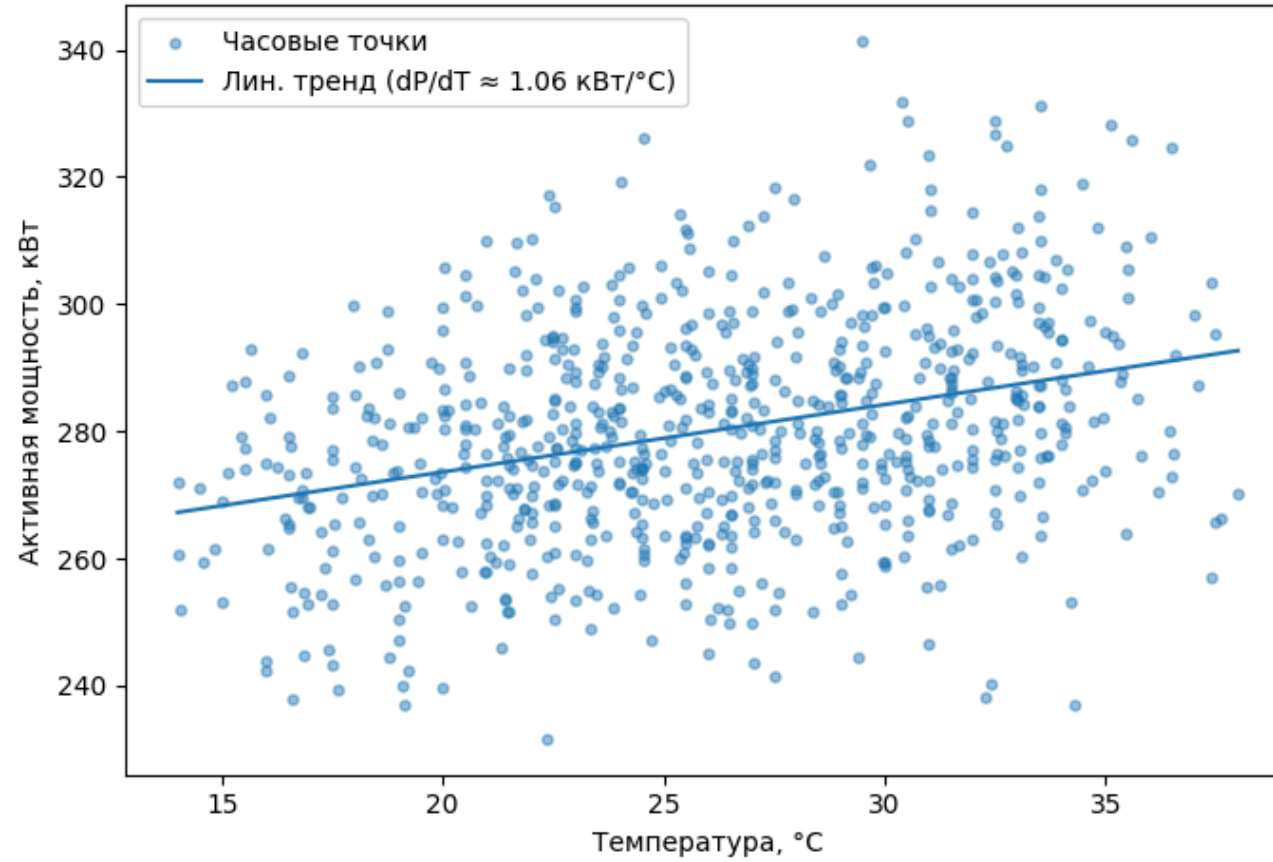
### Метод.

- Почасовая агрегация: `P` — медиана 1ч, `T` — среднее 1ч.
- Линейная регрессия (прямая): наклон трактуем как **средний прирост P на 1 °C**.
- Сохраняем рисунок в `reports/figs/july_scatter_P_T_1h.png`.

### Выход.

- Печатные метрики: `n_points`, `pearson_r`, `spearman_r`, `slope_kw_per_C`.
- График скаттера с трендовой линией и подписью наклона.

Июль 2024: P vs T (1ч)



## 2.10 · Data Understanding — количественная оценка $P \sim T$ (июль, 1ч)

### Результаты анализа (см. скаттер):

- Количество часовых точек: **744** (полный июль).
- Корреляция Пирсона:  $r \approx 0.33$  → умеренная линейная связь.
- Корреляция Спирмена:  $\rho \approx 0.32$  → ранговая зависимость аналогичного уровня.
- Наклон трендовой линии:  $dP/dT \approx 1.06$  кВт/°С → при росте температуры на 1 °С активная мощность увеличивается в среднем на ~1.1 кВт.
- Интерсепт:  $\approx 252$  кВт → базовая нагрузка при низких температурах.
- Коэффициент детерминации:  $R^2 \approx 0.11$  → температура объясняет около **11 % дисперсии** нагрузки (остальное — внутренние режимы склада, циклы оборудования, прочие факторы).

### Интерпретация:

- Температура оказывает статистически значимое, но не доминирующее влияние на нагрузку.
- Тепловая инерция (позже будет показан лаг +2ч) усиливает объясняющую способность модели.
- Даже без учёта лага уже видно: июльский профиль  $P$  имеет термочувствительность, которую можно использовать для прогнозирования и оптимизации режимов.

**Вывод:** Связь «нагрузка ↔ температура» подтверждена и количественно измерена. Это открывает возможность перехода от описательного анализа к предиктивным моделям (например, прогноз нагрузки в жаркие дни и упреждающее управление компрессорами).

## 2.11 · Data Understanding — скан по лагах температуры ( $T \rightarrow P$ )

**Цель.** Определить задержку, с которой температура влияет на активную мощность: вычислить корреляции  $P(t) \sim T(t+L)$  для  $L \in [-6; +6]$  часов (часовая гранулярность), а затем оценить наклон  $dP/dT$  на лучшем лаге.

### Метод.

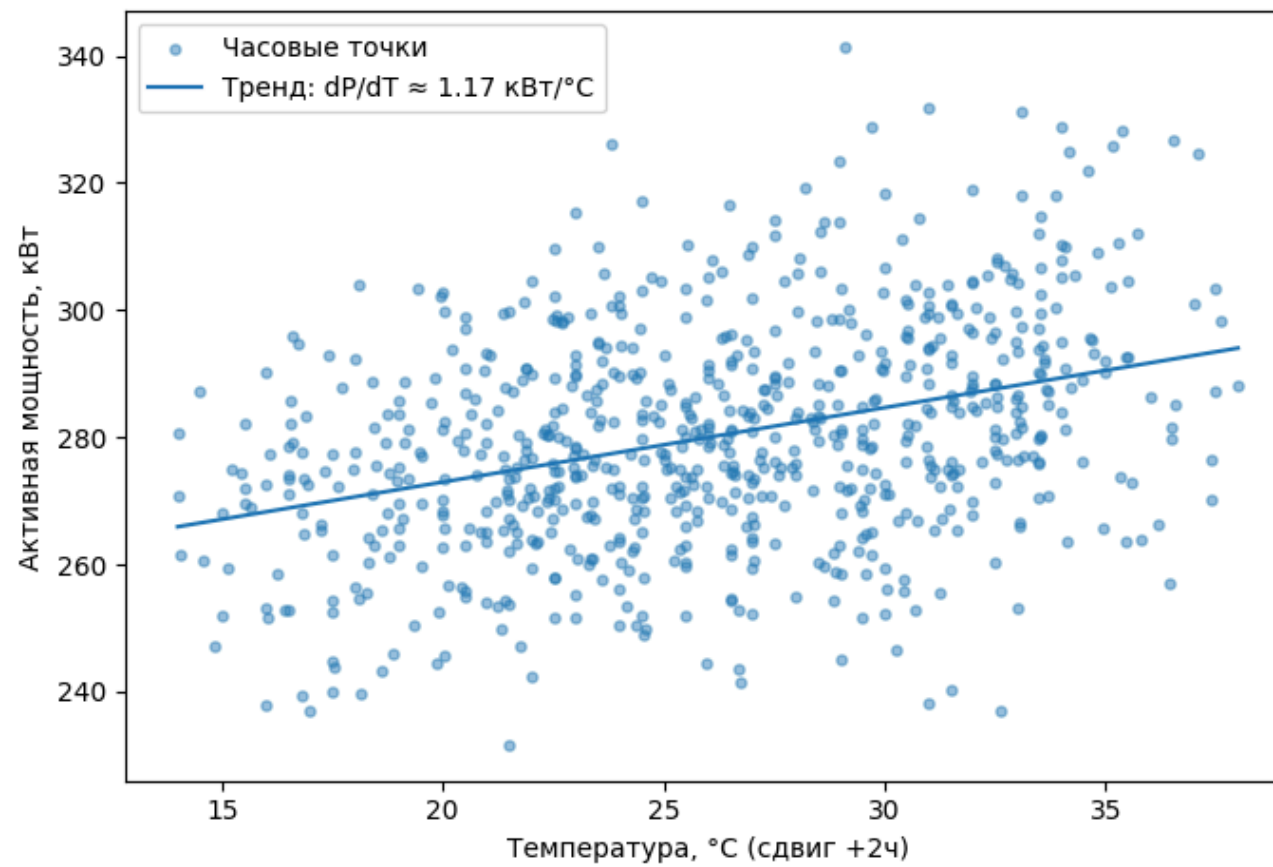
- Почасовая агрегация:  $P$  — медиана 1ч,  $T$  — среднее 1ч.
- Для каждого лага  $L$  считаем Pearson и Spearman между  $P$  и  $T.shift(L)$ .

- На лаге с максимальным |Pearson| оцениваем линейный наклон  $dP/dT$  (кВт/°С).

### **Выход.**

- Таблица корреляций по лагам.
- Лучший лаг и наклон на нём (с числом точек).

Июль 2024: P vs T(+2ч) (1ч)



## 2.9 · Лаг-анализ зависимости активной мощности от температуры

### Методика

Минутные данные агрегированы до часовой гранулярности: для активной мощности использована медиана, для наружной температуры — среднее значение. Для лагов температуры от -6 до +6 часов рассчитаны коэффициенты Pearson и Spearman между  $P$  и  $T$ . Для лучшего лага построена линейная модель  $P \sim T$ .

### Результаты

- Максимальная согласованность получена при лаге  $T \rightarrow P = +2$  часа.
- Корреляции: **Pearson  $\approx 0.36$ , Spearman  $\approx 0.35$ .**
- Наклон регрессии:  **$dP/dT \approx 1.17$  кВт/°С.**
- Интерсепт около **250 кВт** соответствует базовой нагрузке, слабо зависящей от наружной температуры.

### Инженерная интерпретация

Задержка около 2 часов соответствует тепловой инерции ограждающих конструкций и компрессорного контура. Температура влияет на потребление, но не является единственным фактором: корреляция около 0.36 указывает на существенный вклад режима эксплуатации камер, графика открытия дверей, загрузки склада и циклов компрессоров.

Коэффициент  **$dP/dT \approx 1.17$  кВт/°С** означает, что при росте наружной температуры на 1 °С активная мощность увеличивается примерно на 1.2 кВт. Это полезная метрика для прогнозирования нагрузки и оценки чувствительности объекта к погоде.

### Практическое значение

- **Прогнозирование:** лаг +2 часа можно использовать в краткосрочных прогнозах энергопотребления на основе погодных данных.
- **Управление нагрузкой:** результат помогает планировать режимы компрессоров до ожидаемых температурных пиков.
- **Оценка теплоизоляции:** высокая чувствительность к температуре может указывать на резерв по снижению теплопритоков через ограждающие конструкции.
- **Нормативная проверка:** результаты можно сопоставить с требованиями СП 109.13330.2012 и СНиП 2.11.02-87 по теплотехническим характеристикам холодильных складов.

**Вывод:** активная мощность холодильного склада связана с наружной температурой с лагом около 2 часов и чувствительностью  $\sim 1.17$  кВт/°С. Эту зависимость следует учитывать в baseline-моделях и сценариях управления нагрузкой.

## 2.10 · Data Understanding — дневные сводки по P и Q (июль, минутные → дневные)

**Цель.** Получить дневные метрики по активной и реактивной мощности для эксплоринга суточных паттернов и контроля пиков: `min / mean / max / p95`.

**Источник.** `df_jul` из предыдущих шагов (`time`, `active_power_kw`, `reactive_power_kvar`). **Выход.** Таблица по дням (P\_, Q\_) и короткий месячный дайджест «как есть» (по минутным данным).

## 2.11 · Data Understanding — дневные и месячные сводки (июль 2024)

**Данные.** Минутные ряды за июль 2024, агрегированные до **дневных сводок** (`min / mean / max / p95`) по активной и реактивной мощности.

### Основные наблюдения

- **Активная мощность (P):**
  - Средний уровень по месяцу  $\approx 280$  кВт.
  - Верхние квантили стабильны: **p95  $\approx 339$  кВт**, дневные максимумы часто  $> 400$  кВт.
  - Минимальные значения варьируются от 100–150 кВт (ночные провалы) до 180+ кВт (жаркие дни с высокой базовой нагрузкой).
  - Суточный разброс велик: разница между `min` и `max` в пределах суток достигает 250–300 кВт.
- **Реактивная мощность (Q):**
  - Средний уровень  $\approx 217$  кВАр.
  - Верхний квантиль **p95  $\approx 271$  кВАр**, пики доходят до 340 кВАр.
  - Наблюдается устойчиво высокий «фон» реактивки: даже в ночные часы минимум редко  $< 80$ –100 кВАр.
  - На ряде дней (17–19 июля) `Q_mean` превышает 230–235 кВАр, что указывает на перегруженность сети именно в пиковую жару.
- **Суточная динамика:**
  - Чёткая зависимость нагрузки от времени суток: дневные пики (связанные с работой склада) усиливаются в жаркие дни.

- Реактивная мощность следует за активной, но сохраняет высокий уровень даже при снижении P ночью → признак отсутствия компенсации.

### Бизнес-значимость

- При таком уровне **P<sub>p95</sub> ~340 кВт** и **Q<sub>p95</sub> ~270 кВАр** трансформатор и вводное оборудование работают вблизи предельных токов.
- Высокие **дневные Q** создают дополнительный токовый перегруз, что повышает риски нагрева кабелей, просадок напряжения и срабатывания вводных автоматов.
- Даже «средний день» без экстремальной жары содержит часы, когда совокупная нагрузка близка к 400 кВт, что снижает резерв по мощности и надёжности.

### Вывод

Июльский baseline показывает:

- **активная нагрузка** относительно стабильна, но с выраженными дневными пиками;
- **реактивная нагрузка** остаётся постоянно высокой и сопоставима с половиной активной мощности;
- без системной компенсации объект работает в условиях **перегрузки и низкой энергоэффективности**.

**Дальше:** анализируем август после запуска УКРМ, чтобы сравнить профили и показать эффект на тех же метриках.

2.12 KPI: отношение Q/P и эпизоды пиков На этом шаге мы фокусируемся не на повторе сводных метрик, а на дополнительных инженерных показателях, которые реально отражают нагрузку сети: Отношение Q/P (tgφ-подобный показатель) — характеризует долю реактивной мощности в общей схеме нагрузки. Эпизоды пиков: сколько раз и как долго активная и реактивная мощности превышали свой 95-й перцентиль. Это важно для оценки рисков перегрузки кабелей и автоматов: отдельный высокий пик менее опасен, чем серия длительных превышений.

## 2.13 · Интерпретация KPI: отношение Q/P и пики нагрузки

### Ключевые результаты

- Среднее отношение **Q/P = 0.774**: реактивная мощность составляет около 77 % от активной. Такой режим увеличивает ток в сети без соответствующего роста полезной активной мощности.
- 95-й перцентиль **Q/P = 0.851**: в верхних 5 % минут реактивная составляющая почти сопоставима с активной.
- Пики активной мощности **P**: **1181 эпизод**, суммарно **2232 минуты** (~37 часов), максимальная непрерывная длительность **19 минут**.

- Пики реактивной мощности  $Q$ : **1114 эпизодов**, суммарно **2232 минуты** (~37 часов), максимальная непрерывная длительность **21 минута**.

### Практическая трактовка

Частые пики  $P$  и  $Q$  показывают, что объект регулярно работает в высоконагруженном режиме. Совпадение длительности пиков по активной и реактивной мощности означает, что реактивная составляющая растет синхронно с технологической нагрузкой и увеличивает токовую нагрузку на кабели, шины и вводной автомат.

Основные риски:

- перегрев кабелей и распределительных щитов, особенно в узлах с повышенным переходным сопротивлением;
- рост вероятности срабатывания защиты при пусковых и рабочих пиках;
- увеличение потерь в линиях за счет роста тока.

**Вывод:** июльский профиль характеризуется регулярными длительными пиками и высоким уровнем реактивной составляющей  $Q/P \sim 0.8$ . Без компенсации такой режим снижает надежность электроснабжения и увеличивает технологические потери.

## 2.14 · Data Understanding — $\text{tg } \varphi = Q/P$ (июль): факт vs норматив и целевой PF

**Цель.** Показать, насколько фактический  $\text{tg } \varphi$  (отношение  $Q/P$ ) в июле превышает:

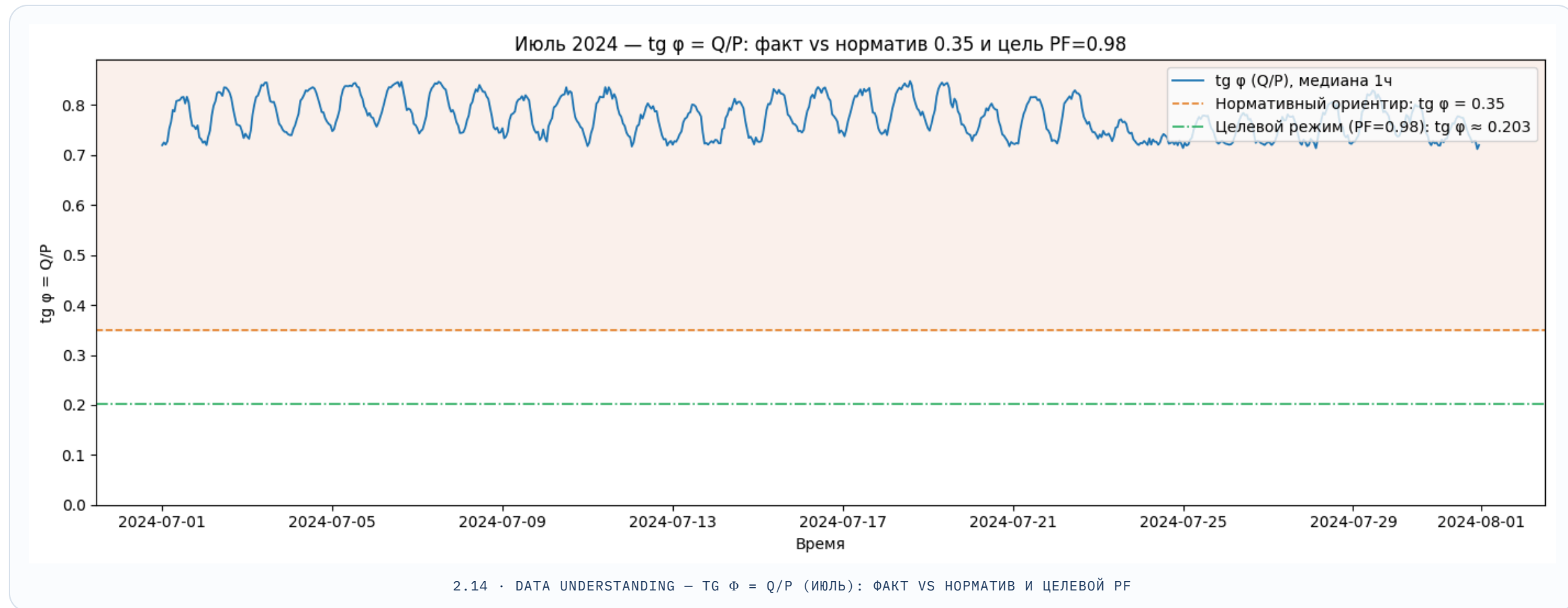
- **нормативный ориентир** для низковольтной точки поставки в часы больших нагрузок —  **$\text{tg } \varphi = 0.35$**  (визуальный референс);
- **целевой режим** при коэффициенте мощности  **$\text{PF} = 0.98$** , что соответствует  **$\text{tg } \varphi \approx 0.203$** .

**Метод.**

- Считаем минутный  $\text{tg } \varphi = Q/P$ ; для читабельности строим **часовую медиану**.
- На графике выделяем линию факта, а также горизонтальные линии «Норматив 0.35» и «Цель PF=0.98».
- Дополнительно считаем долю часов выше каждого порога.

**Выход.**

- Рисунок `reports/figs/july_tgphi_fact_vs_refs.png`.
- Консольный дайджест: процент часов выше норматива и выше целевого  $\text{tg } \varphi$ .



## 2.15 · Data Understanding — tg φ (июль 2024) vs норматив Минэнерго и целевой PF (исправлено)

### Норматив

Для потребителей **ниже 1 кВ** максимальное допустимое значение коэффициента реактивной мощности ( $\text{tg } \varphi = Q/P$ ) в **часы больших суточных нагрузок** — **0.35**.  
Основание: **Приказ Минэнерго РФ от 23.06.2015 № 380** (зарег. Минюстом РФ 22.07.2015 № 38151), **Приложение** «Максимальные значения коэффициента реактивной мощности...».

### Факт (июль, часовые медианы)

- tg φ колебался ~**0.70–0.85**.
- **Часов выше норматива (0.35): 100 %**.
- **Часов выше целевого tg φ при PF=0.98 (≈ 0.203): 100 %**.

| Порог              | tg φ    | Доля часов выше |
|--------------------|---------|-----------------|
| Норматив Минэнерго | 0.35    | <b>100 %</b>    |
| Целевой PF=0.98    | ≈ 0.203 | <b>100 %</b>    |

### Техническая интерпретация

- Работа **систематически вне нормы** по tg φ означает заниженный PF → **завышенные токи** в кабельных линиях/аппаратах, рост **I<sup>2</sup>R-потерь, нагрев** щитов, увеличение **риска отключений** по перегрузке.
- Для выхода на норматив и к целевому PF требуется **компенсация реактивной мощности (УКРМ)** на стороне нагрузок/шины НН.
- Величина фактического tg φ в 2–3 раза выше норматива объясняет наблюдаемые проблемы «перегрев/выбивает», зафиксированные на объекте.

Итог: июль подтверждает необходимость УКРМ как первоочередной меры: снижение tg φ до нормативного диапазона уменьшит токи и надежно снимет токовые риски.

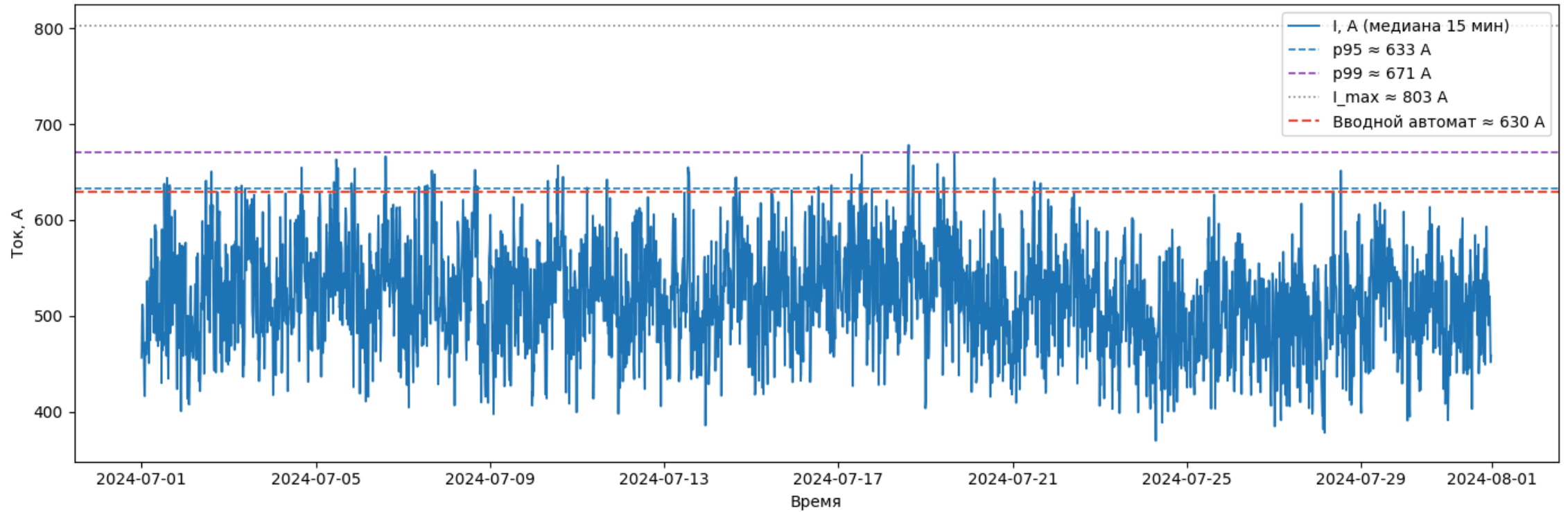
## 2.16 · Engineering Check – расчёт тока линии из P/Q/U + риски по автомату 630 А

**Задача.** Перевести минутные ряды  $P(\text{kW})$ ,  $Q(\text{kVA}\cdot\text{ч})$ ,  $U(\text{V})$  в фазный ток линии  $I(\text{A}) = S(\text{VA}) / (\sqrt{3} \cdot U)$ , где  $S = \sqrt{P^2 + Q^2} \cdot 1000$ , и:

- дать краткий дайджест по току (mean / p95 / p99 / max);
- оценить **длительность эпизодов превышения** порогов (p95, p99,  $0.98 \cdot I_{\text{max}}$ );
- визуализировать часовой профиль тока (медиана 15 мин) с контрольными линиями и **вводным автоматом 630 А** (красный пунктир).

**Почему важно.** Высокий  $\text{tg}\phi \Rightarrow$  завышенный ток  $\Rightarrow$  рост  $I^2R$ -потерь, нагрев, срабатывания автоматов. Этот шаг связывает «реактивку» с реальным эксплуатационным риском на вводе.

Июль 2024 — ток линии I (из P,Q,U) и контрольные пороги



2.16 · ENGINEERING CHECK — РАСЧЁТ ТОКА ЛИНИИ ИЗ P/Q/U + РИСКИ ПО АВТОМАТУ 630 А

## 2.17 · Июль 2024 — анализ токовой нагрузки и рисков по автомату 630 А

### Основные метрики (минутная дискретность)

- Средний ток: ~518 А

- **Медианный ток:** ~517 А
- **95-й перцентиль:** ~633 А, то есть выше номинала автомата 630 А
- **99-й перцентиль:** ~671 А
- **Максимум:** ~803 А

### Длительность эпизодов превышения

- **>= p95:** 1115 эпизодов, суммарно 2232 мин (~37 ч), максимальная длительность ~19 мин.
- **>= p99:** 336 эпизодов, суммарно 447 мин (~7,5 ч), максимальная длительность ~11 мин.
- **>= 0.98·I<sub>max</sub> (~787 А):** 6 коротких эпизодов по 1 мин.
- **I<sub>max</sub> = 803 А:** единичное значение 6 июля.

### Выводы

- **Номинал автомата систематически достигается и превышает.** p95 тока находится выше 630 А, поэтому объект работает в зоне повышенного риска срабатывания защиты и нагрева.
- **Пики кратковременные, но регулярные.** Более 1100 эпизодов выше p95 и более 300 эпизодов выше p99 соответствуют циклической работе компрессоров и пусковым режимам.
- **Максимальная перегрузка существенна.** 803 А соответствует примерно 127 % номинала автомата и увеличивает тепловую нагрузку на контакты, клеммы и шины.
- **Ключевой фактор — реактивная мощность.** При tg φ ~0.77 ток выше, чем в режиме PF≈0.98, примерно на 30-35 %. Эта часть тока не связана с дополнительной полезной активной мощностью, но увеличивает потери и нагрев.

### ⚠ Важная оговорка

На графике не видно фактических отключений автомата. По эксплуатационной информации, после одной из июньских остановок клиент заменил вводной автомат и увеличил тепловую уставку. Поэтому кратковременные перегрузки выше номинала фиксируются как рабочие точки, а не как отключения.

### Практическое значение

- Подтвержден режим эксплуатации вводного автомата в зоне повышенного тока.

- Установка УКРМ должна снизить ток, вывести р95 ниже номинала и уменьшить тепловую нагрузку на распределительную сеть.
- Результаты являются техническим обоснованием компенсации реактивной мощности: снижение токов приводит к снижению потерь, перегрева и вероятности отключений.
- После внедрения компенсации требуется повторная проверка настроек защиты.

# Summary блока Data Understanding (Baseline · июль 2024)

## Контекст

Анализ выполнен на минутных данных электропотребления холодильного склада за июль 2024 года. Ключевые параметры: **активная мощность P (кВт)**, **реактивная мощность Q (кВАр)**, **температура наружного воздуха T (°C)** и **напряжение U (В)**. Цель блока — зафиксировать исходное состояние энергосистемы и подготовить измерительный baseline для сравнения с августовским периодом.

---

## Основные наблюдения

- **Качество данных**

Данные полные и равномерные: 44 640 строк, что соответствует 31 дню с минутной дискретностью. Пропусков и сбоев временного ряда не выявлено.

- **Профиль нагрузок**

Средняя активная мощность составляет ~280 кВт, средняя реактивная мощность — ~217 кВАр. Профиль имеет устойчивую суточную цикличность и выраженные пики, связанные с режимами компрессоров и оттаивания.

- **Температурная зависимость**

Связь активной мощности с наружной температурой умеренная. Лучший лаг — **+2 часа**, наклон зависимости —  **$dP/dT \approx 1.17$  кВт/°C**. Внешняя температура влияет на нагрузку, но критические режимы определяются не только погодой.

- **Дневные агрегаты**

Активная мощность обычно находится в диапазоне 270-290 кВт по средним дневным значениям, пики достигают 420-425 кВт. Реактивная мощность держится в диапазоне 210-230 кВАр по средним значениям, пики достигают ~340 кВАр.

- **$\text{tg } \varphi = Q/P$**

Фактический уровень  $\text{tg } \varphi \approx 0.77$ , 95-й перцентиль  $\approx 0.85$ . Это выше нормативного ориентира  **$\text{tg } \varphi \leq 0.35$**  и выше целевого режима  **$\text{tg } \varphi \approx 0.20$**  для PF=0.98.

- **Токовые нагрузки**

Средний ток составляет ~518 А, 95-й перцентиль — ~633 А, максимум — 803 А. Вводной автомат 630 А работает в зоне превышения номинала; зафиксировано более 1100 эпизодов выше р95.

---

## Инженерные выводы

- Основная техническая проблема: высокая доля реактивной мощности повышает ток, усиливает нагрев распределительных устройств и увеличивает потери в кабельных линиях.
  - Температурный фактор значим для baseline-модели, но не объясняет превышение токов и высокий tg φ.
  - Фактический tg φ стабильно превышает нормативный ориентир, поэтому требуется компенсация реактивной мощности.
  - Вводной автомат эксплуатируется в зоне повышенного тока, что снижает надежность электроустановки и увеличивает риск аварийных остановок.
- 

## Бизнес-значение

- **Надежность:** подтверждена причина перегревов и отключений — высокий ток при избыточной реактивной составляющей.
- **Экономика:** снижение тока должно уменьшить потери в линиях и активное потребление, что проверяется в августовском блоке.
- **Нормативное соответствие:** baseline фиксирует отклонение tg φ от нормативного ориентира и задает контрольный KPI для внедрения УКРМ.

✅ Июльский baseline достаточен для проверки эффекта внедрения: он описывает исходное состояние, ключевые риски и метрики, по которым далее сравнивается период после компенсации.

## 3.0 · Переход к блоку Data Preparation (июль+август)

### Логика перехода

Этап \*Data Understanding\* показал, что основной технический фактор перегрузки — избыточная реактивная мощность  $Q$ . Она повышает ток, усиливает нагрев распределительной сети, увеличивает потери  $I^2R$  и приводит к превышению нормативного ориентира по tg φ. Температура влияет на активную мощность, но не

объясняет высокий  $\text{tg } \varphi$  и превышение токов.

Рабочее инженерное решение — компенсация реактивной мощности на стороне низкого напряжения по основным нагрузкам. Ожидаемые эффекты:

- снижение доли реактивной мощности в профиле нагрузки;
- уменьшение тока в линиях и вводном автомате;
- снижение потерь в кабельных линиях;
- приведение  $\text{tg } \varphi$  к нормативному и целевому уровню.

### Задача текущего этапа

Далее исследование переходит от июльского baseline к сравнению «до/после». Для этого используется объединенный датасет июль+август и выполняется разметка периодов:

- **before** — исходное состояние до включения компенсации;
- **after** — период после включения УКРМ.

Цель блока — подготовить единое представление данных для контрастного анализа: статистики, графиков и проверки влияния внедрения на ключевые метрики энергопрофиля.

## 3.1 · Постановка эксперимента «до/после» и подготовка данных

**Инженерный вывод (по результатам Data Understanding).** Доминирующая причина перегрузок — **избыточная реактивная составляющая (Q)**, что приводит к повышенным токам, потерям  $I^2R$  и систематическому выходу  $\text{tg } \varphi$  за диапазон, установленный Приказом Минэнерго РФ № 380. **Решение:** проект **индивидуальной компенсации реактивной мощности** по основным нагрузкам на стороне НН.

**Цель этого шага.** Перейти к количественной оценке эффекта «до/после»: загрузить объединённый датасет **июль+август**, разметить периоды и подготовить единое представление для контраста.

### Разметка периодов.

- `before` — до включения компенсации;

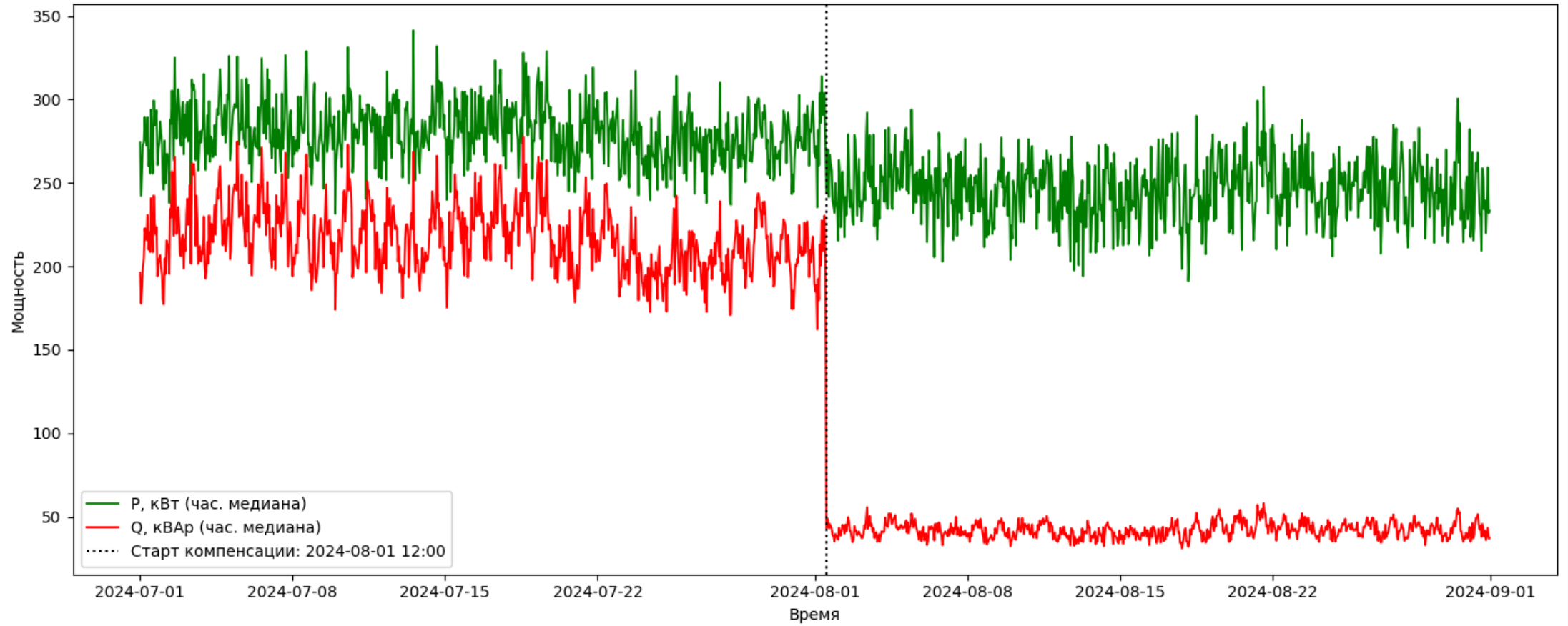
- `after` — после включения;
- **фактический момент включения** УКРМ — **2024-08-01 12:00** (используем его как отсечку).

#### **Методика агрегации для визуализации.**

- Часовая медиана для `P` (кВт) и `Q` (кВАр) — устойчиво к минутным всплескам компрессоров.
- На одном графике: `P` — **зелёным**, `Q` — **красным**; вертикальная пунктирная линия — **момент включения (12:00)**.

На выходе этой ячейки получаем: sanity-check равномерности, базовую сводку по `before/after` и профиль мощности с точной отметкой включения компенсации.

Июль-Август 2024: профиль активной и реактивной мощности (1Н медиана)



### 3.1 · Контраст «до/после» на общем профиле (часовая медиана)

**Что и как визуализировано.** На графике — почасовые медианы активной мощности **P** (зелёный) и реактивной мощности **Q** (красный) за **июль–август 2024**. Вертикальная пунктирная линия — **фактический пуск компенсации: 2024-08-01 12:00**. Минутная сетка исходника равномерная (89280 строк за 62 дня) — sanity-check пройден.

#### Квантитативный контраст по минутным данным (до/после):

- **P\_mean:** 279.95 → **245.99 кВт** (–33.96 кВт, ~–12.1%).
- **P\_p95:** 338.73 → **294.88 кВт** (–12.9%).
- **Q\_mean:** 216.76 → **42.00 кВАр** (–174.76 кВАр, ~–80.6%).
- **Q\_p95:** 271.20 → **57.22 кВАр** (–78.9%).
- **tg φ (Q/P) средний:** **0.77** → **0.17** (выход из «красной зоны» вблизи нормативного диапазона по Приказу Минэнерго № 380).
- **T\_mean (°C):** 26.06 → **23.34** (похолодание, которое частично объясняет падение P; его влияние мы отдельно вычтем в блоке атрибуции экономии).

#### Инженерные выводы по графику и таблице.

- **Реактивная составляющая подавлена ступенькой** ровно с момента пуска — типичный след **индивидуальной компенсации**: Q падает до уровня 40–60 кВАр и удерживается, «пилообразность» почти исчезает.
- **Активная мощность снижается умеренно** (≈-12%), и это сочетание двух факторов:
  - устранение циркуляции реактивной мощности → снижение потерь  $I^2R$  и токов;
  - **температурный фактор** (август прохладнее июля на ~2.7 °C).

В дальнейших шагах отделим вклад температуры от эффекта компенсации (наивный baseline, matching по T и регрессионная модель с лагом +2 ч).

- **Риски по току и отключениям** должны радикально уменьшиться (см. июльский токовый анализ): падение Q → падение тока при близких P и U.

**Что дальше.** Переходим к количественной атрибуции экономии активной энергии и к проверке токов/коэффициента tg φ на августовском участке, с отдельным учётом эффекта температуры.

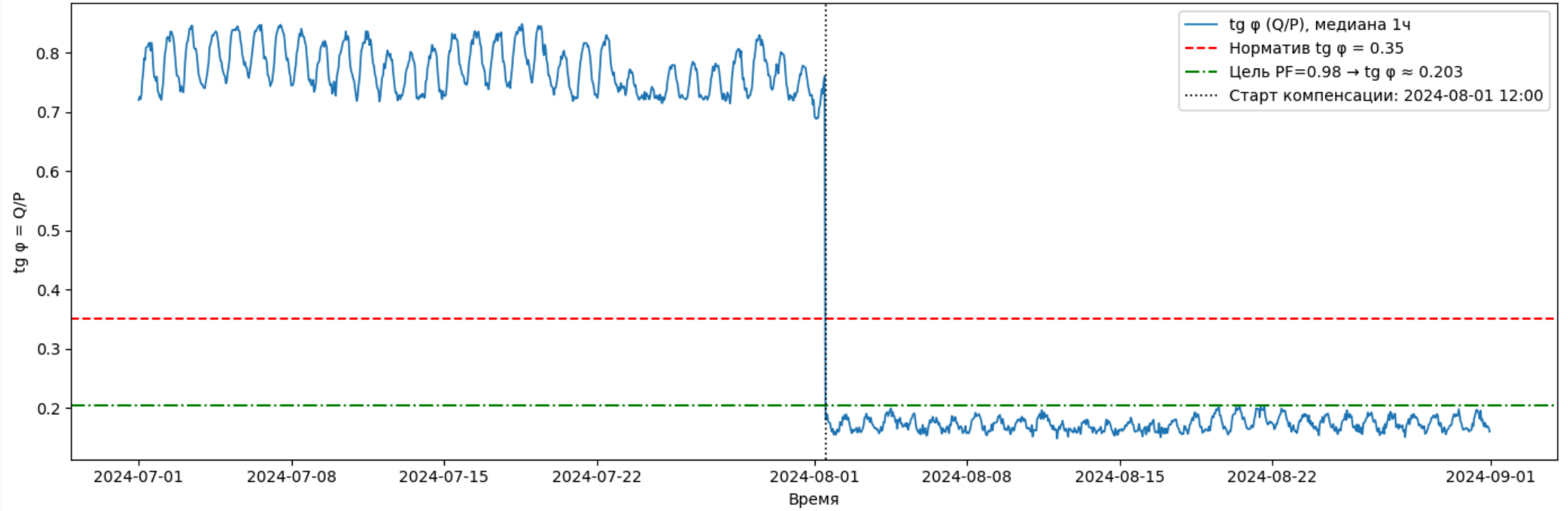
### 3.2 · Контраст $\text{tg } \varphi$ и тока $I$ (часовая медиана), cut-off = 2024-08-01 12:00

Считаем  $\text{tg } \varphi = Q/P$  и фазный ток  $I$  из векториальной суммы  $S = \sqrt{P^2+Q^2}$  при фактическом напряжении  $U$  (если  $U$  нет — 400 В). Строим два графика (без сабплотов):

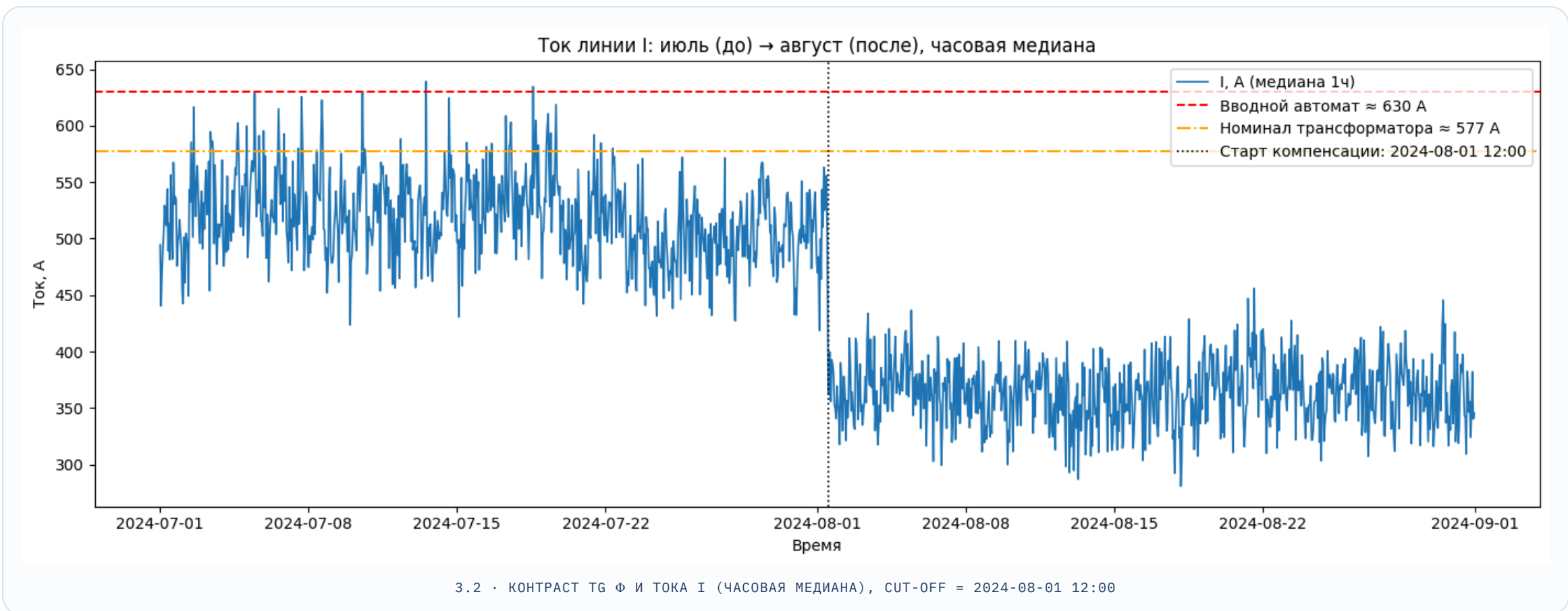
- $\text{tg } \varphi$  во времени с двумя уставками: **норматив 0.35** (Минэнерго № 380) и **целевое PF=0.98** →  **$\text{tg } \varphi \approx 0.203$** .
- Ток  $I$  во времени с уставкой **вводного автомата 630 А** и **номиналом трансформатора 400 кВА  $\approx 577$  А**.

Вертикальная штрих-линия — момент включения компенсации: **2024-08-01 12:00**. Дополнительно выводим поквартильный дайджест по минутным данным и эпизоды превышения 630 А.

tg φ: июль (до) → август (после), часовая медиана



3.2 · КОНТРАСТ ТГ Ф И ТОКА I (ЧАСОВАЯ МЕДИАНА), CUT-OFF = 2024-08-01 12:00



### 3.2 · Контраст «до/после»: tg φ и ток I

Итоги по данным

tg φ = Q/P (медиана по минутам -> агрегация 1 ч):

- до:  $tg\_mean \approx 0.77$ ,  $tg\_p95 \approx 0.85$ ;
- после:  $tg\_mean \approx 0.17$ ,  $tg\_p95 \approx 0.22$ .

#### Ток линии, А (минутные данные -> 1 ч медиана):

- до:  $I\_mean \approx 518$ ,  $I\_p95 \approx 632$ ,  $I\_p99 \approx 671$ ,  $I\_max \approx 803$ ;
- после:  $I\_mean \approx 363$ ,  $I\_p95 \approx 437$ ,  $I\_p99 \approx 457$ ,  $I\_max \approx 509$ .

#### Превышения 630 А:

- до: 2452 мин суммарно, **1193 эпизода**, максимальная непрерывная длительность **19 мин**;
- после: **0 минут, 0 эпизодов**.

---

#### Инженерная интерпретация

- **Компенсация реактивной мощности** с момента включения 01.08.2024 12:00 снизила  $tg \varphi$  с  $\sim 0.77$  до  $\sim 0.17$ . Значение стало ниже нормативного ориентира  **$tg \varphi = 0.35$**  и целевого уровня  **$PF = 0.98 \rightarrow tg \varphi \approx 0.203$** .
- Снижение  $tg \varphi$  напрямую уменьшило ток:  $I\_mean$  снизился более чем на 30 %,  $I\_p95$  — примерно на 31 %, с  $\sim 632$  А до  $\sim 437$  А. После включения УКРМ превышения 630 А не зафиксированы.
- Максимальный ток снизился с  $\sim 803$  А до  $\sim 509$  А. Это уменьшает тепловую нагрузку на шины, контакты, клеммы и изоляцию.
- Активная мощность  $P$  меняется в рамках сезонной и температурной вариации, а реактивная мощность  $Q$  снижается ступенчато после включения УКРМ. Поэтому эффект по току связан именно с уменьшением реактивной составляющей, а не с погодой.

---

#### ✅ Вывод по разделу

- Объект перешел из режима устойчиво повышенной токовой нагрузки в режим, соответствующий нормативному ориентиру по  $tg \varphi$ .
- Технические предпосылки срабатывания вводного автомата 630 А в анализируемом августовском периоде устранены.
- Снижение тока создает основу для экономического эффекта по активной энергии за счет уменьшения потерь в линиях.

### 3.3 · Эффект компенсации: высвобождение мощности трансформаторной подстанции

#### Постановка задачи

Трансформаторная подстанция имеет номинальную мощность **S<sub>nom</sub> (кВА)**. Для эксплуатационной оценки используется безопасный ориентир загрузки **≤ 0.8·S<sub>nom</sub>**. Длительное превышение этого уровня ускоряет старение изоляции, повышает тепловую нагрузку и снижает ресурс трансформатора.

#### Методика расчета

- Рассчитываем полную мощность **S = √(P<sup>2</sup> + Q<sup>2</sup>)**, где **P** — активная мощность (кВт), **Q** — реактивная мощность (кВАр).
- Рассчитываем загрузку трансформатора в процентах от номинала:

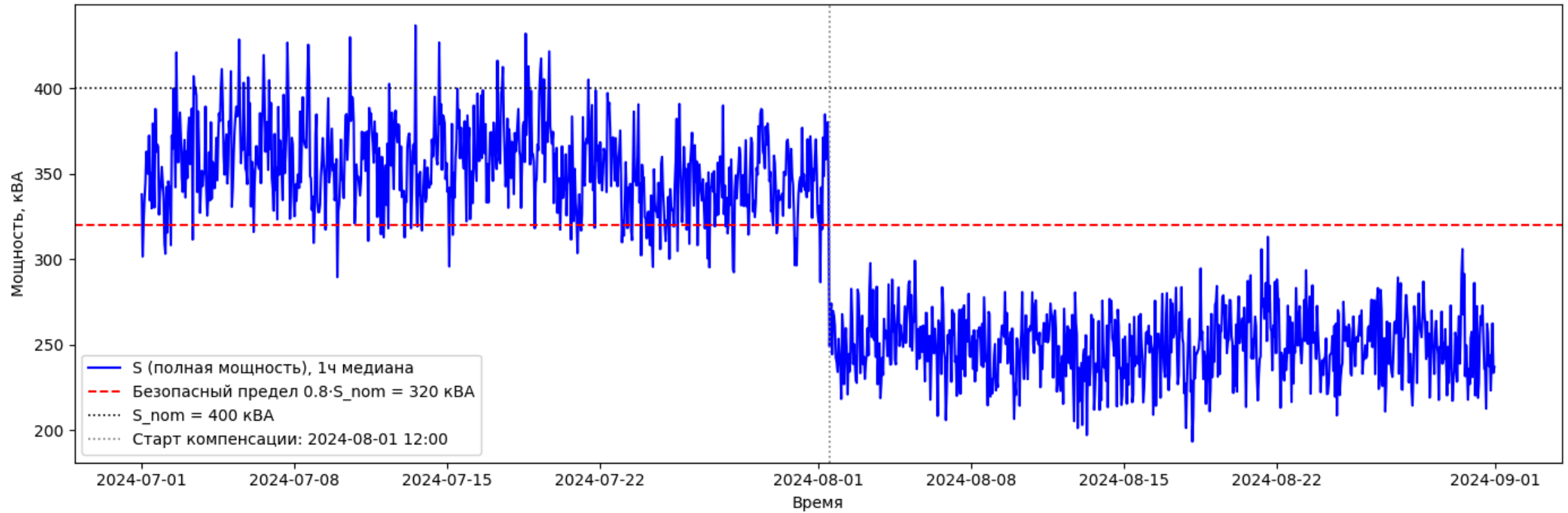
$$\text{Load \%} = S/S_{\text{nom}} * 100\%$$

- Строим профиль загрузки по часовой медиане и разделяем периоды до и после компенсации относительно 01.08.2024 12:00.
- Используем уровень 80 % от **S<sub>nom</sub>** как инженерный ориентир безопасной длительной загрузки.

#### Практическое значение

- Снижение **Q** уменьшает **S** при сопоставимой активной мощности **P**.
  - Снижение полной мощности высвобождает резерв трансформатора.
  - Резерв можно использовать для подключения дополнительных потребителей или для повышения надежности работы в пиковые часы.
-

Июль-Август 2024: загрузка трансформатора (по полной мощности S)



3.3 · ЭФФЕКТ КОМПЕНСАЦИИ: ВЫСВОБОЖДЕНИЕ МОЩНОСТИ ТРАНСФОРМАТОРНОЙ ПОДСТАНЦИИ

### 3.3 · Эффект компенсации: высвобождение мощности трансформатора

Результаты расчета ( $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ , 1 ч медиана)

- Июль, до компенсации:

- средняя полная мощность: ~354 кВА;
- максимум: ~546 кВА;
- нагрузка часто превышала безопасный ориентир  $0.8 \cdot S_{\text{ном}} = 320 \text{ кВА}$ .
- **Август, после включения УКРМ 01.08.2024 12:00:**
- средняя полная мощность: ~250 кВА;
- максимум: ~348 кВА;
- нагрузка в основном находится ниже 320 кВА, за исключением кратких эпизодов.

### Инженерная интерпретация

До компенсации трансформатор ТМ-400 работал выше длительного безопасного ориентира:  $S_{\text{mean}} \approx 354 \text{ кВА} > 0.8 \cdot 400 \text{ кВА} = 320 \text{ кВА}$ . Это повышало тепловую нагрузку и ускоряло старение оборудования.

После компенсации реактивной мощности средняя полная мощность снизилась примерно на **105 кВА** или **~30 %**. Это вернуло режим ближе к безопасному диапазону, высвободило резерв мощности и снизило тепловые потери  $I^2R$ .

### Практическое значение

- Высвобожден резерв трансформатора для дополнительных нагрузок или повышения надежности текущей схемы.
- Снижен риск перегрева распределительных устройств и связанных с ним аварийных остановок.
- Созданы условия для устойчивой эксплуатации в летний период без систематического превышения расчетного ориентира загрузки.

**Вывод:** компенсация реактивной мощности улучшила профиль токов и  $\text{tg } \varphi$ , а также снизила среднюю полную мощность трансформатора примерно на 100 кВА.

## 3.4 · Методы оценки экономии активной энергии

### Цель

Оценить экономию **по активной энергии**  $P$  после включения компенсации реактивной мощности 01.08.2024 12:00. Реактивная составляющая  $Q$  напрямую не тарифицируется, поэтому финансовый эффект рассчитывается через изменение активного потребления и потерь. Ключевая методическая задача — отделить

эффект УКРМ от влияния температуры.

---

## Примененные методы

### 1. `naive_hod` — hour-of-day baseline

- Идея: для каждого часа августа использовать среднюю активную мощность июля за тот же час суток.
- Преимущество: простой и воспроизводимый референс.
- Ограничение: не учитывает погодный фактор, поэтому может смещать оценку при различии температур июля и августа.

### 2. `match_temp` — почасовое сопоставление по температуре

- Идея: для каждого часа августа подобрать июльские часы с тем же часом суток и близкой температурой.
- Инструмент: подбор аналогов по `hour` и `T` с допуском 0.5-2.0 °C, при необходимости fallback на k-ближайших.
- Преимущество: снижает погодное смещение без параметрической модели.
- Ограничение: зависит от представительности июльских наблюдений.

### 3. `reg_temp` — регрессионный baseline

- Идея: построить модель зависимости активной мощности от температуры и внутрисуточного цикла.
- Признаки: `T(+2h)`, `sin(2pi·hod/24)`, `cos(2pi·hod/24)`, константа.
- Обучение: только июльский период до компенсации.
- Прогноз: август после 01.08.2024 12:00.
- Преимущество: объяснимая модель с учетом температурной чувствительности и суточного цикла.
- Ограничение: линейная аппроксимация не описывает все нелинейные и календарные факторы.

---

## Обоснование выбора

- `naive_hod` используется как базовый ориентир без метеокоррекции.

- `match_temp` дает непараметрическую погодную коррекцию.
  - `reg_temp` дает параметрическую оценку с объяснимыми коэффициентами.
  - Итоговый консенсус берется по температурно-устойчивым методам `match_temp` и `reg_temp`.
- 

### Дальнейшая проверка

- Сравнить экономию в кВт·ч и рублях по каждому методу.
- Проверить сходимость `match_temp` и `reg_temp`; малое расхождение будет признаком устойчивости оценки.
- Для последующей валидации расширить baseline на соседние месяцы и проверить чувствительность к жарким дням, выбросам и режимам оттаивания.

Далее в коде рассчитываются кВт·ч, рублевый эффект и консенсусная оценка по `match_temp` + `reg_temp`.

## 3.3 · Экономия активной энергии: методы, сходимость и итоговые цифры

### Контекст

Компенсация реактивной мощности была введена **01-08 в 12:00**, поэтому август делится на:

- **атрибутированную часть августа** (фактически отработанные часы с 01-08 12:00 по 31-08 23:59 — 732 ч),
  - и эквивалент «**весь август**» (пересчёт на 744 ч: что было бы, если бы установка работала весь месяц).
- 

### Применённые методы (и причины выбора)

- `naive_hod` — базовый профиль «час-дня»: для каждого часа августа берётся средняя `P` за тот же час по июлю.
- Прост и интерпретируем; даёт верхнюю оценку экономии, но не учитывает погоду.
- `match_temp` — почасовой **температурный матчинг**: для каждого часа августа ищутся июльские часы с тем же часом суток и близкой температурой.
- Устраняет погодные искажения; нечувствителен к форме распределения.
- `reg_temp` — **OLS-регрессия** на июле:

$$P \sim T(+2ч) + \sin(2\pi \cdot \text{час}/24) + \cos(2\pi \cdot \text{час}/24)$$

- Даёт параметрический baseline, учитывающий погоду и суточный цикл; устойчив к шуму.

В дальнейшем анализе используем **match\_temp** и **reg\_temp** как «очищенные от температуры». **naive\_hod** — референсный ориентир без метеокоррекции.

### Итоги по данным (руб, кВт·ч)

#### Атрибутированная экономия (факт 732 ч после 01-08 12:00):

- **naive\_hod**: 24 899 кВт·ч, 344 858 руб
- **match\_temp**: 22 091 кВт·ч, 305 956 руб
- **reg\_temp**: 21 903 кВт·ч, 303 359 руб

#### Эквивалент «весь август» (пересчёт на 744 ч):

- **naive\_hod**: 25 309 кВт·ч, 350 511 руб
- **match\_temp**: 22 453 кВт·ч, 310 972 руб
- **reg\_temp**: 22 262 кВт·ч, 308 333 руб

#### Консенсус (температурно-очищенный, среднее **match\_temp** & **reg\_temp**):

- Атрибутировано:  $\approx$  21 997 кВт·ч,  $\approx$  304 658 руб
- Эквивалент полный месяц:  $\approx$  22 358 кВт·ч,  $\approx$  309 652 руб

### Относительные эффекты (ориентировочно)

- **naive\_hod**:  $\approx$  12.2 %
- **match\_temp**:  $\approx$  11.0 %

- `reg_temp`:  $\approx 10.9\%$

→ **Экономия стабильно  $\approx 11\%$**  относительно базового потребления.

---

### Сходимость и интерпретация

- Методы `match_temp` и `reg_temp` дают разброс  $< 1\%$ , что подтверждает:

эффект связан с изменением режима **tg  $\phi$  и тока**, а не с погодой.

- `naive_hod` ожидаемо завышает экономию (июль теплее августа).
  - Пересчёт на полный месяц меняет результат всего на  $\sim 1\%$ , что логично (пропущено 12 ч из 744).
- 

### Что это значит для объекта

- Экономия  $\approx 22$  МВт·ч/мес ( $\approx 305$  тыс. руб/мес) при тарифе **13.85 руб/кВт·ч**.
  - В относительном выражении —  $\sim 11\%$  снижения активной энергии при сохранении полезной работы нагрузки.
  - Инженерные метрики подтверждают:
  - tg  $\phi$  снизился с  $\sim 0.77$  до  $\sim 0.17$ ,
  - токи (p95) упали с  $\sim 632$  А до  $\sim 437$  А,
  - эпизоды перегрузки  $> 630$  А исчезли.
- 

### Прогноз годовой экономии

- Эквивалент полного августа:  $\approx 22.4$  МВт·ч/мес,  $\approx 310$  тыс. руб/мес.
- **Годовая оценка:**

22.4 МВт·ч/мес умножить на 12  $\approx 269$  МВт·ч/год; 310 тыс. руб/мес умножить на 12  $\approx 3.7$  млн руб/год

---

### Дальнейшее использование

- В финансовом разделе берём **консенсус (match\_temp & reg\_temp)** как **основу для расчёта ROI**.
- `naive_hod` используем как верхнюю границу оценки.
- Для валидации эффекта в холодный сезон планируется **rolling-регрессия** и обновление пула для температурного матчинга.

## Заключение: комплексный эффект проекта

Внедрение УКРМ изменило электрический режим объекта: снизило  $\text{tg } \varphi$ , уменьшило токовую нагрузку, разгрузило трансформатор и дало измеримый экономический эффект по активной энергии.

Ключевые результаты:

- **Экономия активной энергии:** ~22 МВт·ч/мес.
- **Денежный эффект:** ~310 тыс. руб/мес при тарифе 13.85 руб/кВт·ч.
- **Годовой эквивалент:** ~269 МВт·ч и ~3.7 млн руб.
- **Высвобождение мощности трансформатора:** около 100 кВА по средней полной мощности.
- **Надежность:** после включения УКРМ в анализируемом периоде не зафиксированы эпизоды тока выше 630 А.
- **Нормативный режим:**  $\text{tg } \varphi$  снизился с ~0.77 до ~0.17 и стал ниже контрольного ориентира.

Расчет окупаемости выполняется отдельно на основании фактической стоимости оборудования, монтажа и эксплуатации. По текущей оценке годовой денежный эффект достаточен для экономического обоснования проекта.

---

## Исследовательская и инженерная ценность

Отчет фиксирует полный цикл проверки гипотезы:

- постановка бизнес-задачи и критериев успеха;
  - инструментальный сбор минутных данных;
  - контроль качества и построение baseline;
  - инженерная интерпретация  $\text{tg } \varphi$ , токов и загрузки трансформатора;
  - контрфактическая оценка экономии с погодной коррекцией;
  - перевод технического эффекта в бизнес-показатели.
-

## Итог

Компенсация реактивной мощности дала одновременно технический и экономический результат: объект перешел в контролируемый режим по tg φ и току, снизил потери активной энергии и получил резерв для дальнейшего развития без немедленного увеличения присоединенной мощности.