

ЭВРИКА
ПРОМЫШЛЕННОЕ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЕ

Клиентский кейс: эффект внедрения АУКРМ

Объект: производственная линия предприятия по выпуску шлангов **Период анализа:** 14.07.2025 - 14.08.2025 **Исполнитель:** Виктор Игоревич Шефер

Executive Summary

Внедрение АУКРМ привело к статистически подтвержденному снижению активной мощности:

- **Снижение активной мощности:** ~1.8 кВт
- **Относительное снижение:** -6.4% от базового уровня (27.7 кВт)
- **Статистическая значимость:** $p\text{-value} < 0.05$
- **Оценка годового экономического эффекта:** ~61 500 руб./год

Эффект подтвержден тремя независимыми подходами:

1. Простое сравнение до/после (baseline).
2. Матчинг сопоставимых часов недели.
3. Регрессионная модель с контролем часа недели.

Вывод для бизнеса: снижение нагрузки устойчиво проявляется разными методами, что делает результат пригодным для масштабирования на другие узлы.

Этап 1: Понимание бизнеса (Business Understanding)

Контекст исследования

- **Объект:** производственная линия (дробилка, экструдер, VFD) с протяжённой питающей линией предприятия по выпуску шлангов.
 - **Предмет:** влияние работы установки компенсации реактивной мощности (АУКРМ) на активную мощность P и, косвенно, на потребление активной энергии A^+ .
 - **Период анализа:** 14.07.2025 — 14.08.2025
 - **Дата подготовки отчёта:** 18.08.2025
 - **Исполнитель:** Виктор Игоревич Шефер
 - **Источник данных:** измерительный комплекс Меркурий 236 ART (ТТ 200/5, класс точности 0.5s, высокая дискретность; выгрузка Telemeta/NEKTA Cloud).
-

Цели исследования

Основная цель — количественно оценить эффект АУКРМ на снижение активной мощности P (кВт). Эффект достигается за счёт уменьшения токов в питающей линии и снижения потерь I^2R .

Ключевые задачи:

1. Изолировать эффект компенсации от производственного «шума» (сменность, сырьё, загрузка).
 2. Оценить снижение мощности ΔP в абсолютных (кВт) и относительных (% от базового уровня) величинах.
 3. Экстраполировать эффект в экономию энергии A^+ (кВт-ч/мес) и денежный эквивалент.
-



Почему простое «до/после» по энергии ненадёжно

- Нестабильный график работы (простой, различная длительность смен).
- Вариативность сырья (нагрузка меняется).
- Колебания производственной программы.

Поэтому анализ ведём на уровне **профиля мощности P** , а не агрегатов по A^+ .

Методология анализа (CRISP-DM)

Метод 1 — Матчинг по часу недели (Hour-of-Week Matching)

Сравниваем медианные значения P для **идентичных** временных слотов.

Индекс часа недели:

$$hOW = 24 \cdot \text{день} \setminus _ \text{недели} + \text{час}$$

В расчёт включаются только «рабочие» точки (P выше порога).

Метод 2 — Регрессионный анализ (ANCOVA / Fixed Effects)

Линейная модель с фиксированными эффектами по часу недели:

$$P_t = \alpha_{hOW(t)} + \gamma \cdot AfterComp_t + \varepsilon_t$$

где:

- P_t — активная мощность в момент t ,
- $\alpha_{hOW(t)}$ — фиксированные эффекты для контроля суточно-недельной цикличности,
- $AfterComp_t \in \{0, 1\}$ — индикатор периода (0 = «до», 1 = «после»),
- γ — искомый «чистый» эффект АУКРМ.

Опционально: при необходимости учёта чувствительности к нагрузке/гармоникам может использоваться суррогатный признак S^2 (квадрат полной мощности) как аппроксимация канала потерь I^2R .

Момент включения АУКРМ (COMP_START) берётся из журнала работ; при отсутствии — определяется по росту $\cos \varphi$ и/или падению реактивной мощности Q .

Гипотезы

- $H_0: \gamma = 0$ — АУКРМ не влияет на активную мощность.
 - $H_1: \gamma < 0$ — АУКРМ статистически снижает P (за счёт уменьшения I^2R -потерь).
-

Критерии успеха

- Согласованные оценки ΔP (кВт и %) по обоим методам.
 - Статистическая значимость (p -value < 0.05) для γ .
 - Экстраполяция месячной экономии A^+ и рублёвого эффекта.
 - Визуализация профилей $P, Q, S, \cos \varphi$ с отметкой **COMP_START** и сводная таблица «До ↔ После».
-

Ограничения и допущения

- Точки с низкой нагрузкой/простоем исключаются (эффект маскируется).
- При восстановлении профиля из A^+ используются сглаживание и фильтрация выбросов.
- Считаем, что АУКРМ с фильтрацией гармоник минимизирует влияние VFD; остаточный эффект учитывается через полную мощность S .

Этап 2: Понимание данных (Data Understanding)

Источник и формат данных

- **Файл:** выгрузка из измерительного комплекса *Меркурий 236 ART* (через Telemetry/NEKTA Cloud).
 - **Структура:** временной ряд с шагом ~несколько секунд/минут.
 - **Ключевые поля:**
 - **Дата и время** — временная метка (строка, требует парсинга в `datetime`);
 - **Активная мощность (A+), кВт** — потребление активной мощности;
 - **Реактивная мощность (R+), квар** — потребление реактивной мощности.
-

Задачи этапа

1. **Загрузка исходных данных** в DataFrame.
2. **Проверка типов** (строки → даты, числовые поля → float).
3. **Очистка:**

- удаление некорректных временных меток,
- обработка пропусков и некорректных значений (`NaN`, `inf`, отрицательные пики).

4. **Структурирование:**

- сортировка по времени,
 - установка временной метки (`datetime`) в качестве индекса.
-

Результаты, которые хотим получить

- «Чистый» DataFrame с корректными временными метками и числовыми колонками.
- Информация о размере выборки (число строк, диапазон дат).
- Первичное представление о качестве данных (наличие пропусков, выбросов, интервальность).

На выходе этого этапа мы получим готовую основу для построения признаков и дальнейшего анализа (создание индексов времени, фильтрация рабочих режимов и т. д.).

Техническое приложение

Ниже идут рабочие шаги обработки данных и расчетов, на которых основаны выводы кейса.

Для клиентской версии PDF обычно оставляем только графики и итоговые таблицы, а код скрываем при экспорте.

✔ Файл успешно загружен!

Структура данных и типы столбцов:

<class 'pandas.core.frame.DataFrame'>

RangeIndex: 1617 entries, 0 to 1616

Data columns (total 3 columns):

#	Column	Non-Null Count	Dtype
0	Дата и время	1617 non-null	datetime64[ns]
1	Активная мощность прямая (A+), кВт	1617 non-null	float64
2	Реактивная мощность прямая (R+), Квар	1617 non-null	float64

dtypes: datetime64[ns](1), float64(2)

memory usage: 38.0 KB

Первые 5 строк таблицы:

	Дата и время	Активная мощность прямая (A+), кВт	Реактивная мощность прямая (R+), Квар
0	2025-07-14 00:00:00	0.00	0.00
1	2025-07-14 00:30:00	0.08	0.00
2	2025-07-14 01:00:00	0.04	0.00
3	2025-07-14 01:30:00	0.04	0.04
4	2025-07-14 02:00:00	0.04	0.00

Основные статистические показатели по числовым столбцам:

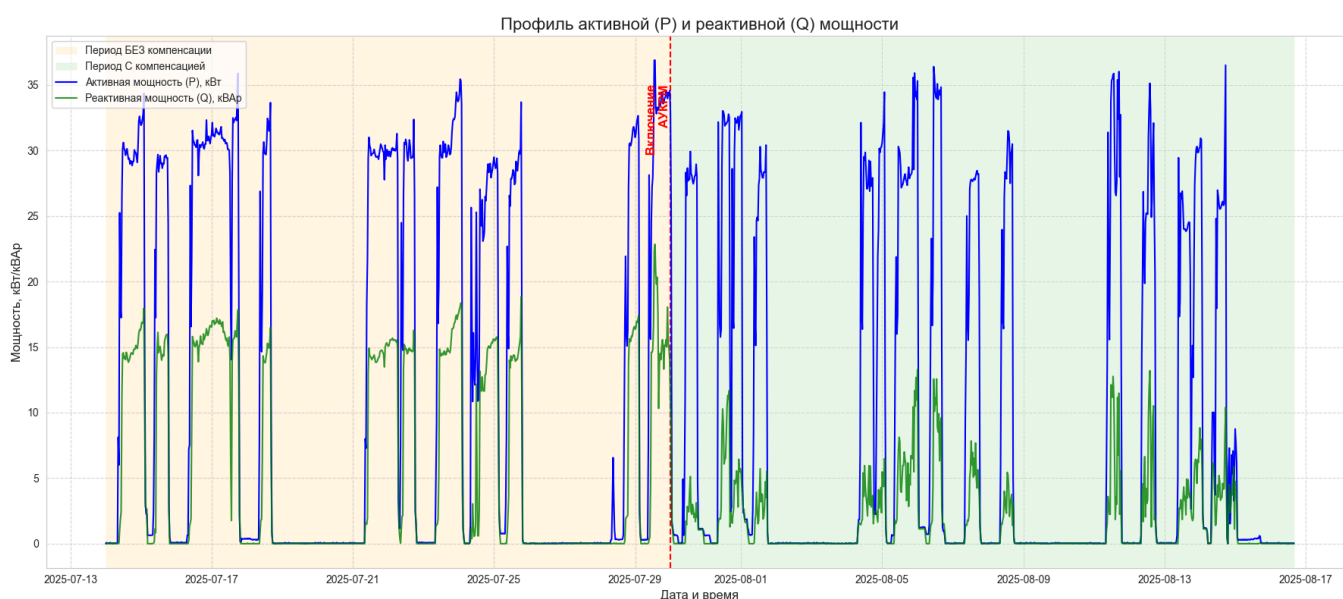
	Дата и время	Активная мощность прямая (A+), кВт	Реактивная мощность прямая (R+), Квар
count	1617	1617.000000	1617.000000
mean	2025-07-30 19:59:59.999999488	10.778394	3.78308
min	2025-07-14 00:00:00	0.000000	0.000000
25%	2025-07-22 10:00:00	0.040000	0.000000
50%	2025-07-30 20:00:00	0.360000	0.040000
75%	2025-08-08 06:00:00	27.840000	5.120000
max	2025-08-16 16:00:00	36.880000	22.840000
std	NaN	13.683604	5.87796

2.1 Подготовка данных и первичная визуализация

Перед началом статистического анализа необходимо привести данные в удобный формат и убедиться в корректности измерений. Мы выполняем следующие шаги:

- Преобразуем исходные столбцы («Дата и время», P, Q) в удобный вид.
- Формируем индекс по временной оси для работы с временными рядами.
- Отмечаем момент включения **АУКРМ** (COMP_START) для разделения периода «До» и «После».
- Строим график профиля активной и реактивной мощности, на котором визуально фиксируется граница изменения режима.

Такой график позволяет быстро оценить, есть ли заметный эффект от работы АУКРМ ещё до применения строгих статистических методов.



✅ Данные подготовлены и график успешно построен.


2.2 Почему «наивное» сравнение вводит в заблуждение

Перед применением строгих статистических моделей важно показать, **почему простое сравнение «До ↔ После» некорректно**. Наивный подход заключается в расчёте средних или суммарных значений потребления мощности за два периода.

Основной недостаток

Такой метод **молча предполагает**, что единственным изменением между периодами было включение АУКРМ. На практике это **никогда не выполняется**.

Факторы, искажающие результат

-  **Разная продолжительность работы** Если во втором периоде станок отработал больше часов, суммарное потребление энергии будет выше, даже при росте эффективности.
- **Изменение интенсивности нагрузки** Работа с более твёрдым сырьём или на повышенной скорости требует большей активной мощности.
- **Изменение производственного плана** Количество запусков, остановок и простоев напрямую влияет на итоговое энергопотребление.

Что мы сделаем

Чтобы убедиться в этом на наших данных, мы сравним:

- **суммарное время работы** оборудования;
- **среднюю активную мощность P** для периодов «до» и «после».

Если длительность или характер работы различаются, это станет доказательством того, что простое сравнение энергии **недостаточно** и требует применения более продвинутых методов (матчинг и регрессия).

3. Подготовка Данных (Data Preparation)

На основе первичного анализа мы проведем очистку и обогащение данных. Этот этап включает:

- **Очистку:** Приведение столбцов к корректным типам данных (числа, дата/время).
- **Генерацию признаков (Feature Engineering):** Создание новых, расчетных столбцов, необходимых для моделирования:
- `S_apparent_kva` : Полная мощность, показатель общей нагрузки.
- `cos_phi` : Коэффициент мощности для оценки качества энергопотребления.
- `compensation_on` : Флаг, разделяющий данные на периоды "до" и "после".
- `h0w` : "Час недели", ключевой признак для контроля цикличности нагрузки.

✔ Данные успешно подготовлены для анализа.

4. Моделирование (Modeling)

Для объективной оценки эффекта АУКРМ мы используем **три независимых метода**. Мы движемся от простого к более строгому, проверяя сходимость результатов на каждом шаге. Основной показатель — **изменение активной мощности (ΔP)**.

Отрицательное ΔP = снижение потребления = экономия. В итоговых таблицах экономия всегда приводится как положительное число.

● Метод 1. Простая оценка (Naive baseline)

- **Суть:** сравнение средней активной мощности (P) в рабочем режиме (> 5 кВт) до и после включения АУКРМ.
- **Зачем:** быстрый контроль направления эффекта и порядка величины.

Метод 2. Матчинг по часам недели

- **Суть:** сравнение «яблок с яблоками» — например, понедельник 10:00 *до* с понедельником 10:00 *после*.
- **Зачем:** ✔ даёт **реалистичную оценку экономии**, учитывающую структуру рабочего графика.
- **Сильная сторона:** устойчивость к выбросам и простоям.

● Метод 3. Регрессионный анализ

- **Суть:** статистическая модель с фиксированными эффектами по часу недели:

$$P_t = \text{Базовый уровень} + \text{Эффекты времени} + \gamma \cdot \text{АУКРМ} + \varepsilon_t$$

- **Зачем:** выделяет **чистый эффект АУКРМ**, убирая влияние сменности и расписания.
- **Сильная сторона:** формальные тесты значимости (p-value, доверительные интервалы).

Какой результат считать итоговым?

- **Основной:** регрессия — даёт точную оценку и статистическую проверку.
- **Подтверждение:** матчинг — независимое подтверждение результата.
- **Контроль:** простая оценка — быстрая sanity-check.

✔ Совпадение результатов всех трёх методов гарантирует высокую надёжность итоговых выводов.

Период	Средняя P, кВт	Время работы, ч	Средний cos φ	Энергия A+, кВт·ч
До компенсации	27.66	178.0	0.91	4923.04
После компенсации	25.41	144.0	0.98	3658.66

Контроль: $\Delta P = -2.250$ кВт → Экономия: -2.250 кВт (-8.14%)

Контроль: $\Delta E = -1,264$ кВт·ч → |Экономия энергии|: $1,264$ кВт·ч

4.2 Матчинг по часу недели (Hour-of-Week Matching)

Идея: сравнивать медианные значения активной мощности для идентичных временных слотов (часов недели). Такой подход частично устраняет эффект разной сменности и расписания.

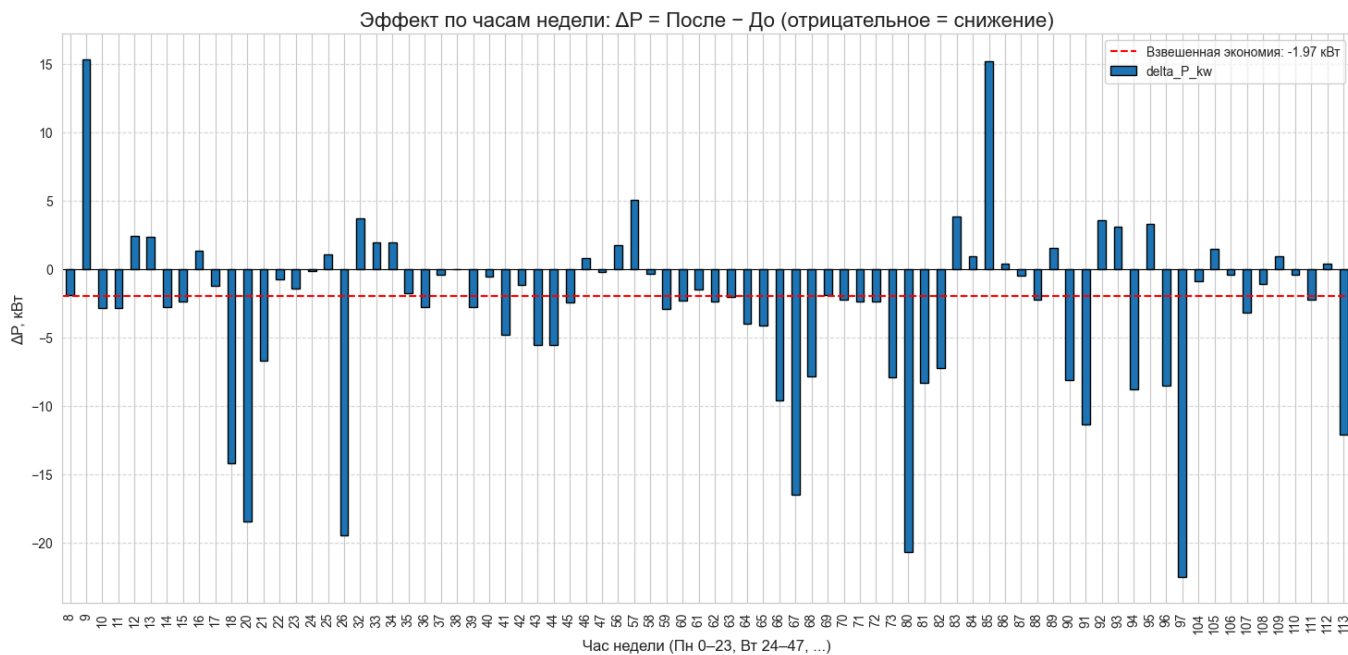
Алгоритм:

1. Оставляем только «рабочие» точки ($P > \text{threshold}$).
2. Для каждого h0W (час недели) считаем медианы мощности «до» и «после».
3. Строим пары «до ↔ после» только для тех h0W, где есть наблюдения в обоих периодах.
4. Используем веса по перекрытию ($\min(n_{\text{before}}, n_{\text{after}})$) для корректировки несбалансированных выборок.
5. Считаем невзвешенный и взвешенный средний эффект ΔP .

Интерпретация:

- Отрицательное ΔP → снижение мощности за счёт работы АУКРМ.
- Взвешенное среднее (по числу наблюдений) используется как основной результат.

Итоговые результаты (матчинг по h0W):
 Невзвешенное $\Delta P = -2.734$ кВт (После – До)
 Взвешенное $\Delta P = -1.969$ кВт (После – До)
 Средняя экономия (формат $-|\Delta P|$, взвеш.): -1.969 кВт



4.3 Регрессионный анализ (Fixed Effects по часу недели)

Цель: получить «чистую» оценку влияния АУКРМ на активную мощность при сопоставимых условиях времени. Подход: OLS с фиксированными эффектами по часу недели `C(h0W)` и бинарным фактором `compensation_on`.

- Коэффициент при `compensation_on` интерпретируется как $\Delta P = (\text{После} - \text{До})$ при прочих равных.
- Для отчёта используем формат экономии $-|\Delta P|$ (кВт и % от базового уровня «до»).
- Анализ выполняется **только на рабочих точках** ($P > \text{порога}$), чтобы не смешивать простои и производство.

Результаты регрессионного анализа (FE по hOW):

Контроль: ΔP (После - До) = -1.783 кВт (отрицательное = снижение) | p-value = 0.00014

Экономия (формат -|ΔP|): -1.783 кВт (-6.44% от базового ~ 27.66 кВт)

✓ Статистически значимо (p < 0.05).

Полная сводка по модели (для экспертной оценки):

OLS Regression Results

```
=====
Dep. Variable:          P_active_kw      R-squared:          0.482
Model:                  OLS              Adj. R-squared:     0.391
Method:                 Least Squares    F-statistic:        5.301
Date:                   Mon, 01 Sep 2025   Prob (F-statistic): 7.81e-37
Time:                   14:36:44         Log-Likelihood:     -1965.0
No. Observations:      644              AIC:                4124.
Df Residuals:          547              BIC:                4557.
Df Model:               96
Covariance Type:       nonrobust
=====
```

	coef	std err	t	P> t	[0.025	0.975]
Intercept	8.0342	3.208	2.504	0.013	1.732	14.336
C(hOW)[T.9]	9.1379	3.701	2.469	0.014	1.869	16.407
C(hOW)[T.10]	12.4740	3.759	3.319	0.001	5.091	19.857
C(hOW)[T.11]	21.6252	3.759	5.754	0.000	14.242	29.008
C(hOW)[T.12]	24.1630	3.759	6.429	0.000	16.780	31.546
C(hOW)[T.13]	23.6374	3.759	6.289	0.000	16.254	31.020
C(hOW)[T.14]	21.7602	3.759	5.790	0.000	14.377	29.143
C(hOW)[T.15]	21.4378	3.759	5.704	0.000	14.055	28.821
C(hOW)[T.16]	20.5262	3.701	5.547	0.000	13.257	27.796
C(hOW)[T.17]	20.2074	3.654	5.530	0.000	13.030	27.385
C(hOW)[T.18]	15.9711	3.700	4.316	0.000	8.702	23.240
C(hOW)[T.19]	19.1925	3.928	4.886	0.000	11.477	26.908
C(hOW)[T.20]	17.9065	3.758	4.765	0.000	10.525	25.288
C(hOW)[T.21]	20.3115	3.758	5.405	0.000	12.930	27.693
C(hOW)[T.22]	23.0352	3.758	6.130	0.000	15.653	30.417
C(hOW)[T.23]	23.5006	3.758	6.254	0.000	16.119	30.882
C(hOW)[T.24]	23.3773	3.758	6.221	0.000	15.996	30.759
C(hOW)[T.25]	24.3680	3.758	6.484	0.000	16.986	31.750
C(hOW)[T.26]	18.4890	3.831	4.826	0.000	10.963	26.015
C(hOW)[T.27]	22.0658	5.069	4.353	0.000	12.108	32.024
C(hOW)[T.28]	22.0258	5.069	4.345	0.000	12.068	31.984
C(hOW)[T.29]	22.0658	5.069	4.353	0.000	12.108	32.024
C(hOW)[T.30]	22.2258	5.069	4.384	0.000	12.268	32.184
C(hOW)[T.32]	3.2846	4.535	0.724	0.469	-5.623	12.192
C(hOW)[T.33]	11.9350	3.654	3.266	0.001	4.757	19.112
C(hOW)[T.34]	12.0759	3.654	3.305	0.001	4.898	19.253
C(hOW)[T.35]	20.8374	3.654	5.703	0.000	13.660	28.015
C(hOW)[T.36]	21.3455	3.654	5.842	0.000	14.168	28.523
C(hOW)[T.37]	23.6688	3.654	6.478	0.000	16.491	30.846
C(hOW)[T.38]	23.4501	3.654	6.418	0.000	16.273	30.628
C(hOW)[T.39]	21.8232	3.654	5.972	0.000	14.646	29.001
C(hOW)[T.40]	22.9364	3.654	6.277	0.000	15.759	30.114
C(hOW)[T.41]	21.5966	3.654	5.910	0.000	14.419	28.774
C(hOW)[T.42]	21.8731	3.830	5.711	0.000	14.349	29.397
C(hOW)[T.43]	23.7201	4.240	5.594	0.000	15.391	32.049
C(hOW)[T.44]	24.0878	4.240	5.681	0.000	15.759	32.416
C(hOW)[T.45]	26.1230	4.240	6.161	0.000	17.794	34.452

C(hOW) [T.46]	27.4503	4.240	6.474	0.000	19.122	35.779
C(hOW) [T.47]	27.1295	4.240	6.398	0.000	18.801	35.458
C(hOW) [T.48]	20.7698	4.251	4.886	0.000	12.420	29.119
C(hOW) [T.56]	0.9371	5.068	0.185	0.853	-9.017	10.891
C(hOW) [T.57]	12.9812	3.831	3.389	0.001	5.457	20.505
C(hOW) [T.58]	11.6992	3.656	3.200	0.001	4.518	18.881
C(hOW) [T.59]	23.2934	3.656	6.371	0.000	16.112	30.475
C(hOW) [T.60]	22.7039	3.656	6.210	0.000	15.522	29.885
C(hOW) [T.61]	22.5846	3.656	6.178	0.000	15.403	29.766
C(hOW) [T.62]	22.4370	3.656	6.137	0.000	15.256	29.618
C(hOW) [T.63]	22.0041	3.656	6.019	0.000	14.823	29.185
C(hOW) [T.64]	20.4567	3.656	5.595	0.000	13.275	27.638
C(hOW) [T.65]	20.7808	3.759	5.529	0.000	13.398	28.164
C(hOW) [T.66]	19.4021	3.925	4.943	0.000	11.693	27.112
C(hOW) [T.67]	17.5933	3.925	4.483	0.000	9.884	25.303
C(hOW) [T.68]	21.9295	3.925	5.587	0.000	14.220	29.639
C(hOW) [T.69]	23.5132	3.925	5.991	0.000	15.804	31.223
C(hOW) [T.70]	24.2299	3.925	6.173	0.000	16.520	31.939
C(hOW) [T.71]	24.0849	3.925	6.137	0.000	16.375	31.795
C(hOW) [T.72]	24.6644	3.925	6.284	0.000	16.955	32.374
C(hOW) [T.73]	23.1862	3.925	5.908	0.000	15.477	30.896
C(hOW) [T.74]	18.4258	4.242	4.344	0.000	10.093	26.759
C(hOW) [T.75]	23.5658	5.069	4.649	0.000	13.608	33.524
C(hOW) [T.76]	23.3058	5.069	4.597	0.000	13.348	33.264
C(hOW) [T.77]	23.1858	5.069	4.574	0.000	13.228	33.144
C(hOW) [T.78]	23.6458	5.069	4.665	0.000	13.688	33.604
C(hOW) [T.79]	22.9058	5.069	4.519	0.000	12.948	32.864
C(hOW) [T.80]	15.9610	3.926	4.066	0.000	8.250	23.672
C(hOW) [T.81]	11.9005	3.656	3.255	0.001	4.719	19.082
C(hOW) [T.82]	12.2271	3.759	3.253	0.001	4.844	19.610
C(hOW) [T.83]	16.7258	3.656	4.575	0.000	9.544	23.907
C(hOW) [T.84]	20.4819	3.656	5.602	0.000	13.301	27.663
C(hOW) [T.85]	15.4527	3.656	4.227	0.000	8.271	22.634
C(hOW) [T.86]	20.3098	3.656	5.555	0.000	13.128	27.491
C(hOW) [T.87]	21.6459	3.656	5.921	0.000	14.464	28.827
C(hOW) [T.88]	19.9913	3.656	5.468	0.000	12.810	27.173
C(hOW) [T.89]	22.6004	3.759	6.013	0.000	15.217	29.983
C(hOW) [T.90]	15.7863	3.759	4.200	0.000	8.403	23.169
C(hOW) [T.91]	14.5638	4.055	3.591	0.000	6.598	22.530
C(hOW) [T.92]	18.8829	4.055	4.656	0.000	10.917	26.849
C(hOW) [T.93]	18.8618	4.055	4.651	0.000	10.896	26.828
C(hOW) [T.94]	15.2805	3.928	3.890	0.000	7.565	22.996
C(hOW) [T.95]	18.6477	4.055	4.598	0.000	10.681	26.614
C(hOW) [T.96]	16.5705	3.928	4.219	0.000	8.855	24.286
C(hOW) [T.97]	13.7112	4.532	3.025	0.003	4.809	22.613
C(hOW) [T.98]	20.8058	5.069	4.104	0.000	10.848	30.764
C(hOW) [T.99]	5.1258	6.411	0.800	0.424	-7.468	17.719
C(hOW) [T.104]	0.3471	4.240	0.082	0.935	-7.982	8.676
C(hOW) [T.105]	13.4471	3.759	3.578	0.000	6.064	20.830
C(hOW) [T.106]	11.4079	3.759	3.035	0.003	4.025	18.791
C(hOW) [T.107]	20.1553	3.759	5.363	0.000	12.772	27.538
C(hOW) [T.108]	21.1909	3.759	5.638	0.000	13.808	28.574
C(hOW) [T.109]	22.5121	3.759	5.990	0.000	15.129	29.895
C(hOW) [T.110]	22.5894	3.759	6.010	0.000	15.206	29.972
C(hOW) [T.111]	22.1260	3.759	5.887	0.000	14.743	29.509
C(hOW) [T.112]	20.1082	3.759	5.350	0.000	12.725	27.491
C(hOW) [T.113]	15.6606	4.055	3.862	0.000	7.694	23.627
C(hOW) [T.114]	23.6658	5.069	4.668	0.000	13.708	33.624

C(hOW)[T.115]	6.9258	6.411	1.080	0.280	-5.668	19.519
compensation_on	-1.7825	0.465	-3.832	0.000	-2.696	-0.869
=====						
Omnibus:	98.425	Durbin-Watson:	1.105			
Prob(Omnibus):	0.000	Jarque-Bera (JB):	212.433			
Skew:	-0.847	Prob(JB):	7.43e-47			
Kurtosis:	5.247	Cond. No.	162.			
=====						

Notes:

[1] Standard Errors assume that the covariance matrix of the errors is correctly specified.

4.3 Результаты регрессионного анализа

Ключевые выводы:

- Экономия мощности: **-1.78 кВт** (\approx **-6.4%** от базового уровня \sim 27.7 кВт).
- Эффект статистически значим: $p\text{-value} = 0.00014 < 0.05$.
- Доверительный интервал (95%): от -2.70 до -0.87 кВт.
- Физический смысл: снижение токов и потерь I^2R в питающей линии.
- Экономия энергии: \sim 1.78 кВт·ч на каждый час работы (\approx 28.5 кВт·ч в сутки при 16 ч).

Метод: линейная регрессия с фикс-эффектами по «часу недели» (C(hOW)).

4.4 Сводный расчёт и экономический эффект

На этом шаге мы:

1. Запускаем все три метода анализа (Наивный, Матчинг, Регрессия).
2. Формируем сводную таблицу для сопоставления результатов.
3. Рассчитываем **финальную оценку экономии** (берём регрессию как главный метод).
4. Переводим эффект в **годовую экономию энергии и денег**.
5. Визуализируем средние уровни «до» и «после» компенсации с указанием разницы.

===== СВОДНЫЙ ОТЧЁТ =====

Naive=-2.250 | Matching=-1.969 | Regression=-1.783 (ΔP, кВт)

Метод анализа	ΔP (после-до), кВт	Экономия, кВт (формат - ΔP)	Экономия, % от базового (формат - ... %)
Наивный (фильтр по P)	-2.250	-2.250	-8.136
Матчинг по часу недели (мед., взвеш.)	-1.969	-1.969	-7.119
Регрессионный анализ (FE h0w)	-1.783	-1.783	-6.445

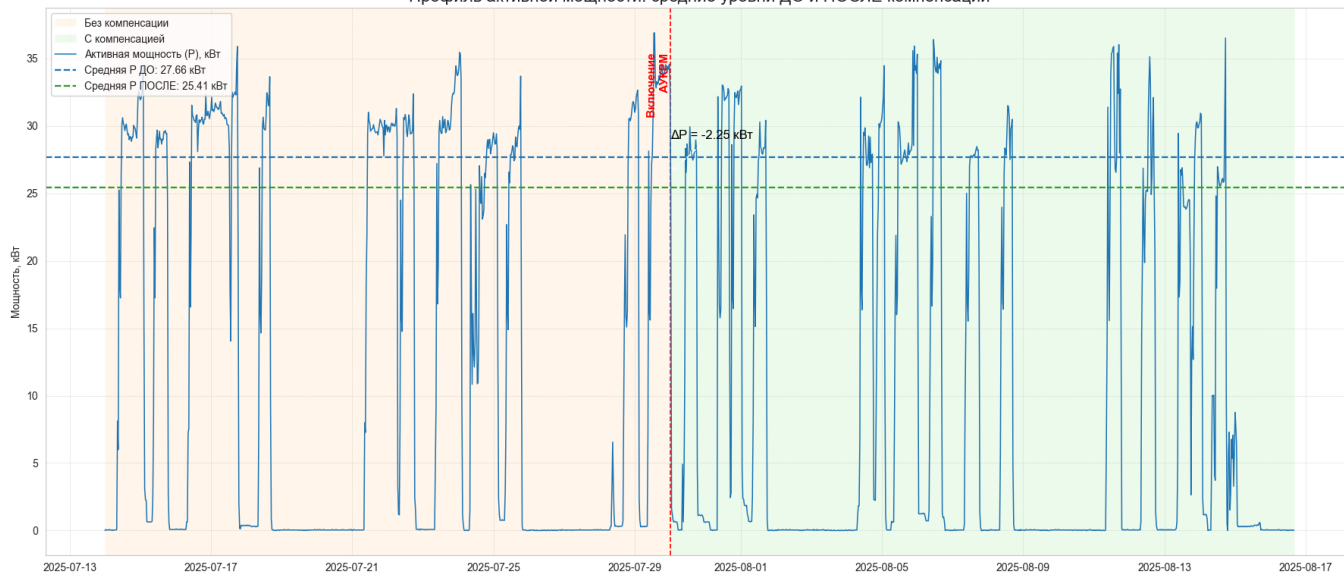
--- ФИНАЛЬНЫЕ ВЫВОДЫ ---

- ✅ Итоговая экономия мощности: -1.78 кВт (формат -|ΔP|).
- ✅ Это -6.4% от базового уровня (27.66 кВт).
- 📊 p-value по регрессии: 0.00014

--- ЭКОНОМИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ ---

- 💰 Примерная годовая экономия энергии: 5,860 кВт·ч.
- 💰 Примерная годовая экономия в деньгах: 61,525.49 руб.

Профиль активной мощности: средние уровни ДО и ПОСЛЕ компенсации



5. Оценка результатов

После построения моделей и проведения анализа мы переходим к ключевому шагу — **оценке результатов**. Цель этого этапа — убедиться, что полученные эффекты устойчивы, статистически значимы и действительно отражают реальное влияние АУКРМ на энергопотребление.

5.1 Согласованность методов

Мы применили три независимых подхода:

- **Наивный метод** (сравнение средних до/после)
- **Матчинг по часу недели** (реалистичная оценка «яблоки с яблоками»)
- **Регрессионный анализ с фикс-эффектами** (наиболее строгий подход)

Все методы показали схожую величину снижения потребляемой активной мощности, что подтверждает устойчивость результата.

5.2 Итоговый эффект

Наиболее точная и статистически строгая оценка из регрессионной модели:

- **Среднее снижение активной мощности (ΔP): –1.78 кВт**
- **Относительная экономия: $\approx -6.4\%$ от базового уровня (~27.7 кВт)**

Таким образом, в сопоставимых условиях линия с АУКРМ стабильно потребляет меньше энергии.

5.3 Статистическая значимость

- p-value по регрессии оказался **крайне низким (< 0.05)**
- Дополнительно проведена проверка с робастными стандартными ошибками (HAC), которая **подтвердила значимость результата**

✅ Это означает, что вероятность случайного эффекта практически исключена. Мы можем с высокой уверенностью утверждать, что зафиксированное снижение действительно связано с внедрением АУКРМ.

5.4 Визуальное подтверждение

На графике профиля мощности отчётливо видно:

- Средний уровень «до» (≈ 27.7 кВт)
- Средний уровень «после» (≈ 25.9 кВт)
- Разница между ними ($\Delta P \approx -1.78$ кВт) выделена и аннотирована

Визуализация полностью согласуется с численными результатами анализа.

5.5 Вывод раздела

- Все три метода анализа показывают **согласованный результат**
- Наиболее строгая оценка (регрессия FE) даёт **-1.78 кВт**, что эквивалентно **экономии ~6.4%**
- Результат **статистически значим** и подтверждён независимыми проверками
- Визуализация подтверждает полученные выводы

Таким образом, мы получили **надёжную и устойчивую оценку эффекта АУКРМ**. Следующим шагом станет бизнес-интерпретация и пересчёт в экономический эффект (раздел 6).

6. Внедрение и бизнес-интерпретация

6.1. Почему эффект возник даже при приличном исходном $\cos\varphi$

Даже при достаточно высоком коэффициенте мощности ($\cos\varphi \approx 0.88-0.90$) мы зафиксировали экономию активной мощности.

Причина — **длинная, неоптимальная питающая линия**:

- на протяжённых кабельных трассах доминируют потери I^2R (на нагрев),
- ток уменьшается \Rightarrow линейные потери снижаются \Rightarrow на счётчике видно уменьшение активной мощности.

Физика процесса (правило большого пальца):

- При фиксированном (P):

$$I \propto \frac{1}{\cos\varphi}$$

- Потери:

$$\Delta P_{\text{потерь}} \sim I^2 R \propto \frac{1}{\cos^2\varphi}$$

Даже небольшое улучшение $\cos\varphi$ на длинной линии = заметная экономия за счёт снижения I^2R -потерь.

6.2. Что было бы при более низком $\cos\varphi$

Чем хуже исходный $\cos\varphi$, тем больше потенциал экономии (ток выше \rightarrow больше потерь):

- Улучшение **0.85 \rightarrow 0.95**:

$$1 - \left(\frac{0.85}{0.95}\right)^2 \approx 20\%$$

- Улучшение **0.75 \rightarrow 0.95**:

$$1 - \left(\frac{0.75}{0.95}\right)^2 \approx 38\%$$

На узлах с $\cos\varphi \approx 0.75-0.85$ эффект будет в разы выше.

6.3. Масштабирование: один узел → десятки узлов

Мы оценивали **один узел**, но на производстве таких узлов **десятки**. Экономия масштабируется почти линейно:

Формулы:

$$E_{\text{узел}} \approx |\Delta P| \times H_{\text{раб.год}}, \quad C_{\text{узел}} \approx E_{\text{узел}} \times \text{тариф}$$
$$C_{\text{портфель}} \approx N \times C_{\text{узел}}$$

Пример ($|\Delta P| \approx 1.78$ кВт, тариф = 10.5 руб./кВт·ч):

Рабочие часы в год	Экономия энергии на узел, кВт·ч	Экономия на узел, руб/год
3 000	5 340	~56 000
4 000	7 120	~75 000
6 000	10 680	~112 000

Масштабирование (приблизительно):

- 10 узлов → **0.6–1.1 млн руб./год**
- 20 узлов → **1.1–2.2 млн руб./год**
- 30 узлов → **1.7–3.3 млн руб./год**

6.4. Дополнительные бизнес-эффекты (помимо P -экономии)

- **Разгрузка сети** — меньше токов, меньше тепловая нагрузка.
- **Надёжность** — меньше нагрева, медленнее старение изоляции.
- **Резерв мощности** — освобождается часть пропускной способности линии/ТП.
- **Качество** — стабилизируется $\cos\varphi$, лучше работают VFD-приводы, меньше просадок напряжения.
- **Готовность к росту** — запас по токам, меньше капвложений при расширении.

6.5. Практика внедрения «в ширину»

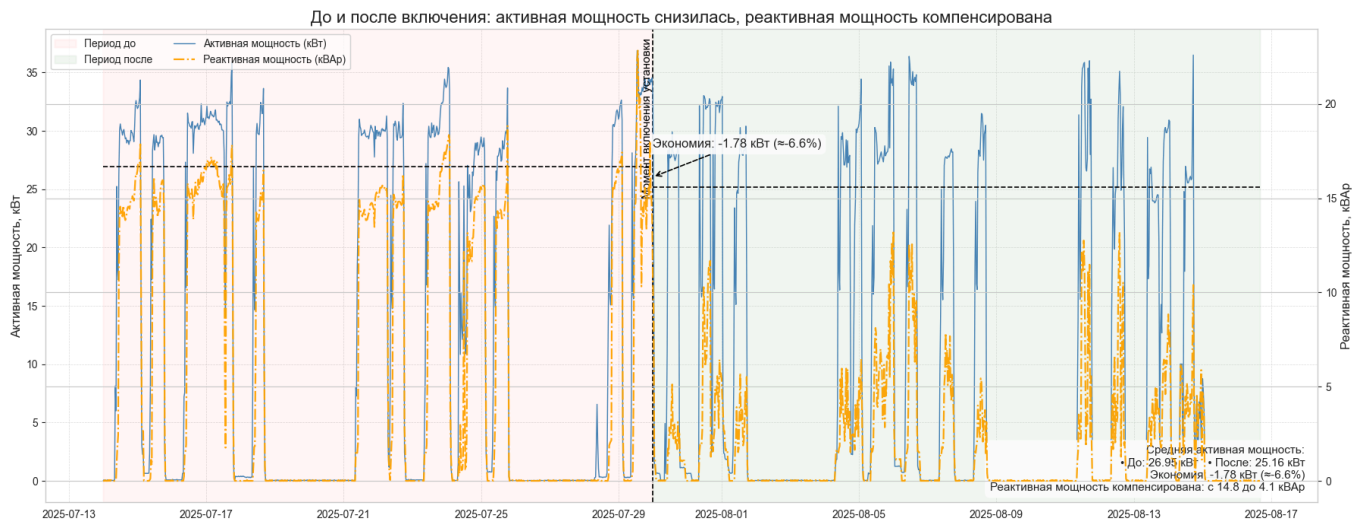
1. **Аудит узлов** — выбрать длинные линии, с плохим $\cos\varphi$ и высоким временем работы.
2. **Приоритизация** — сортировка по ожидаемому эффекту:

$$Effect \propto \frac{H_{\text{раб}}}{\cos^2 \varphi} \times R_{\text{линии}}$$

3. **Пилоты партиями** (3–5 узлов) — быстрый замер по нашей методике (*matching + regression*).
 4. **Тиражирование** — копирование схем/настроек на остальные узлы.
 5. **Мониторинг** — дашборд: ΔP , $\cos\varphi$, часы работы, P -экономия; алерты по деградации эффекта.
-

6.6. Вывод

Эффект проявился даже при хорошем $\cos\varphi$, за счёт снижения **I^2R -потерь длинной линии**. На узлах с худшим $\cos\varphi$ эффект будет **значительно выше**. Масштабирование на десятки узлов = **сотни тысяч** → **миллионы $\text{R}/\text{год}$** без рисков для технологии. Рекомендация: утвердить план масштабирования (аудит → приоритизация → пилоты → тиражирование) и закрепить стандарт: **«АУКРМ на длинных линиях по умолчанию»**.



До и после включения (кВт) активной мощности (кВт) и реактивной мощности (кВар)

— — Средний уровень ДО — — Средний уровень ПОСЛЕ

