



LASTDIRIGENT · РЕФЕРЕНСНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Досье

Доказательство энергосистемы, построенной end-to-end

Полностью самостоятельно построенная энергосистема — от сбора данных через прогноз цены и оптимизацию нагрузки до локального ИИ-брифинга. Это досье документирует метод и доказательства референсного исследования.

PRÜFSTAND №
c3badce30b4aca78

ОКНО НАБЛЮДЕНИЯ
2184 ч · 91 дней

УСТАНОВКА (МОДЕЛЬ)
Referenz-Kühlhaus München (Modell)

СОСТОЯНИЕ: 2 АПРЕЛЯ 2026 – 1 ИЮЛЯ 2026

Краткий вывод

Динамические тарифы на электроэнергию превращают момент потребления в рычаг затрат. На модели холодильного склада — работающего как тепловой накопитель — исследование показывает, как сдвинуть нагрузку в дешёвые часы. Все цифры взяты из замороженного версионированного набора данных.

ЗАТРАТЫ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

-18,4 %

249,75 € за 89 дней по сравнению с чистым термостатным управлением

ОТРИЦАТЕЛЬНЫЕ ЦЕНЫ

249 ч

обнаружено в окне (11,5 %) · корреляция доля ВИЭ ↔ цена -0,78

ОШИБКА ПРОГНОЗА

16,77

MAE €/MBt·ч · day-ahead, walk-forward — примерно 3× точнее плоского базиса (51,91).

ИИ-БРИФИНГ

локально

Qwen 3.6 на собственном железе — данные не покидают машину (GDPR)

Вывод

Один фрилансер построил и доказал полную цепочку — инженерию данных, машинное обучение, математическую оптимизацию, локальный ИИ и автоматизацию — как одну воспроизводимую систему. Сборка детерминирована: из тех же исходных данных получается побайтово то же самое досье.

Референсное исследование на модельном холодильном складе (Мюнхен), не внедрение у клиента. Цель: доказательство технической глубины. Границы и допущения раскрыты в приложении.

Задача

С 2025 года динамические тарифы обязательны — биржевая цена меняется каждый час и временами уходит ниже нуля. Момент потребления становится рычагом затрат.

У холодильного склада есть тепловая инерция: он может охлаждать заранее и накапливать холод. Работая как тепловая батарея, он позволяет сдвинуть свою нагрузку в дешёвые часы — не ставя под угрозу холодовую цепь.

Задача этого исследования: система, которая прогнозирует цену на завтра, планирует нагрузку оптимально по стоимости и понятно инструктирует эксплуатацию — от сбора данных до автоматизации, из одних рук.

Динамические тарифы обязательны с 2025 · биржевая цена ежечасно, временами отрицательная

Источники

Каждое утверждение этого досье стоит на публично проверяемых данных — собранных, объединённых и замороженных с подтверждением происхождения.

Цены, структура генерации и погода сводятся в базе временных рядов (TimescaleDB) и фиксируются как версионированный снапшот. Уже здесь виден паттерн: доля возобновляемых источников и цена идут навстречу друг другу.

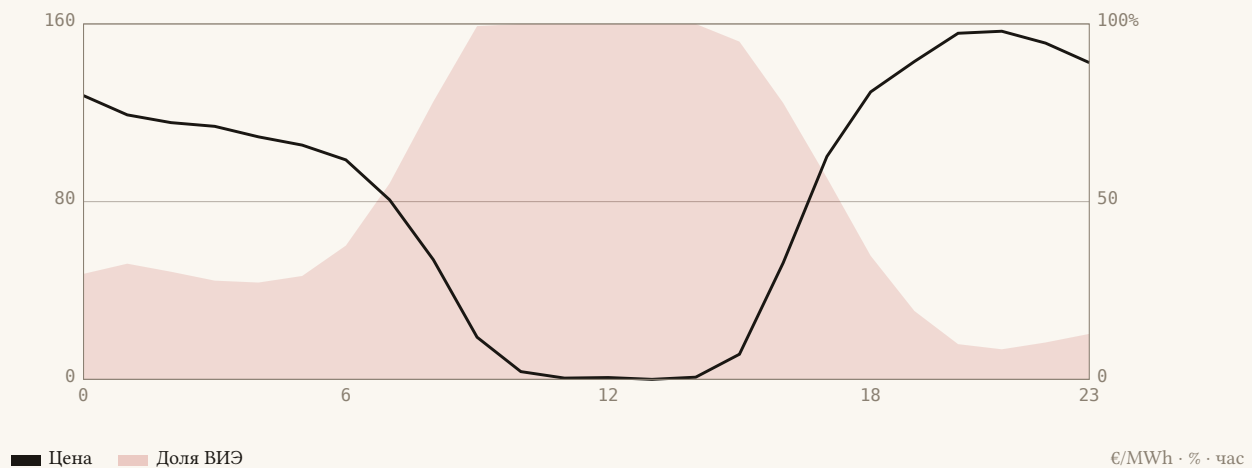
ИСТОЧНИК	СОДЕРЖАНИЕ	ЛИЦЕНЗИЯ
aWATTar	Биржевая цена day-ahead (EPEX)	public (EPEX day-ahead)
Bundesnetzagentur/SMARD	Структура генерации — 9 источников, нагрузка, остаточная нагрузка	Bundesnetzagentur (open)
Bundesnetzagentur/SMARD (Preis)	Оптовая цена DE-LU	Bundesnetzagentur (open)
Open-Meteo/DWD	Погода — температура, солнечная радиация, ветер (Мюнхен)	CC-BY 4.0

Окно 91 дней · 2184 h · 4 источников · München

Паттерн

В полдень солнечная генерация заливает сеть. Доля ВИЭ растёт, цена обваливается — нередко ниже нуля.

Эта «утка» и есть рычаг: кто охлаждает тогда, охлаждает дешевле всего. За окно цены регулярно уходили в минус — кривая показывает образцовый день, на котором связь читается яснее всего.



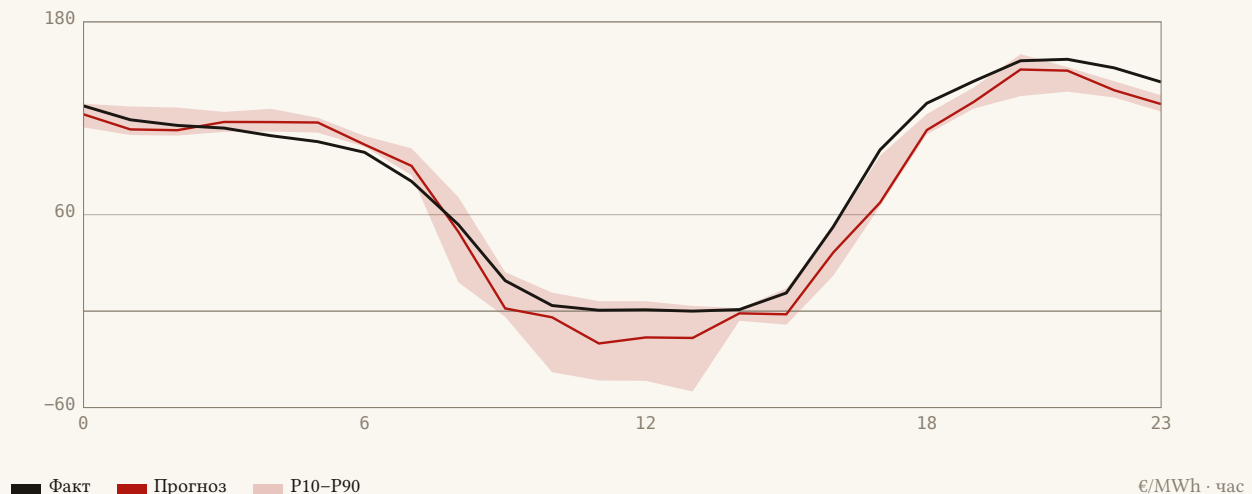
Отрицательные цены 249 h · 11,5 % · корреляция доля ВИЭ ↔ цена -0,78

IV Прогноз

Торговать на день вперёд — значит знать цену завтрашнего дня. Её прогнозирует модель градиентного бустинга — walk-forward, с ежедневным дообучением.

Решает не только точечное значение, но и неопределённость: модель выдаёт квантили P10/P50/P90 и вероятность отрицательных цен. Так план знает собственный риск, вместо того чтобы попасться на мнимую точность.

Какая величина движет цену? Модель нашла это сама: доля возобновляемых источников — важнейший фактор, впереди остаточной нагрузки.



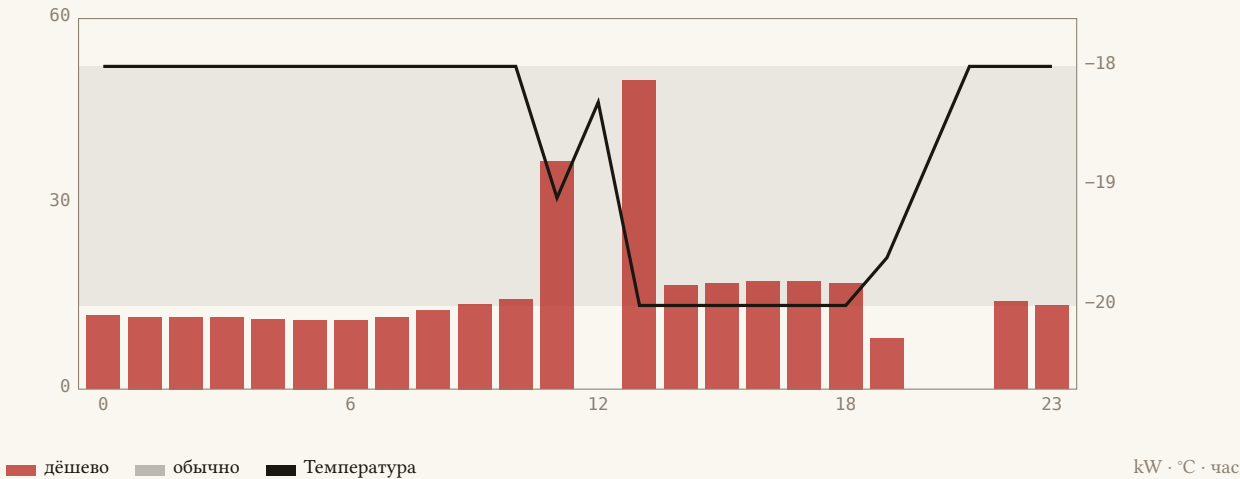
Ошибка прогноза MAE 16,77 · Flat 51,91 · Персистентность 31,03 €/MWh · WAPE 15,7 %

V План нагрузки

Холодильный склад становится батареей: холод — это накопитель, а температурный коридор — его уровень заряда.

Линейная программа оптимизации распределяет холодильную мощность по суткам: минимизирует затраты на электроэнергию, держи коридор, никогда не превышая присоединённую мощность. Честное краевое условие требует к концу суток той же температуры, что и в начале — так измеряется чистая выгода арбитража, а не выхолаживание камеры.

Результат: нагрузка уходит в дешёвые часы, а температура едет по коридору.



Тепловая батарея Коридор $-20\ldots-18^{\circ}\text{C}$ · $P_{\text{max}} 50 \text{ kW}$ · COP 2,5

VI Брифинг

Из цифр рождается рекомендация к действию — сформулированная языковой моделью, которая работает локально, на собственном железе.

Qwen 3.6 (35 B) готовит брифинг на немецком, опираясь на показатели дня. Данные не покидают машину — весомый довод в пользу защиты данных. Если сервер откажет, включается детерминированный шаблон. Однажды созданный брифинг замораживается в досье.

»Laden Sie die Kälteanlage in den günstigen Stunden 11 bis 14 auf, um 2 EUR (20 %) zu sparen. Nutzen Sie dabei den hohen VRE-Anteil von 53 % für eine effiziente Betriebsführung. System schlägt vor, der Mensch entscheidet.«

QWEN 3.6 · ЛОКАЛЬНО · ОБРАЗЦОВЫЙ ДЕНЬ 17 МАЯ 2026

Локальная LLM данные не покидают машину · соответствует GDPR

VII Автоматизация

Цикл работает ежедневно — человек держит руку на рычаге.

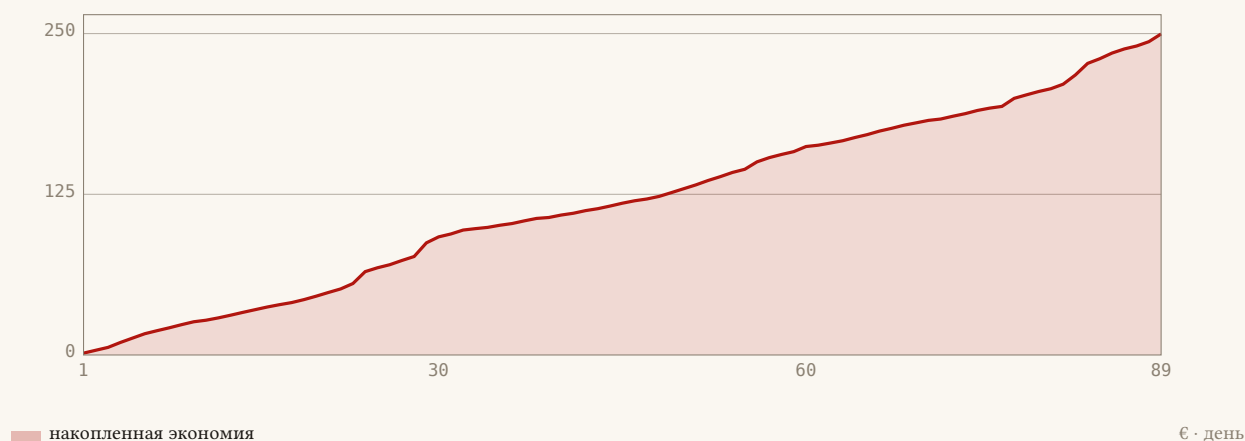
Как только цены day-ahead опубликованы, система проходит фиксированную цепочку. В конце стоит не автоматическое вмешательство, а предложение: система предлагает, человек решает.

- 1 Цены**
загрузка курсов day-ahead (14:00)
- 2 Прогноз**
модель оценивает цену + неопределённость
- 3 План**
LP распределяет холодильную мощность
- 4 Брифинг**
локальная LLM формулирует рекомендацию
- 5 Утверждение**
человек решает — затем сигнал

VIII Доказательство

За полное окно план ощутимо снижает затраты на электроэнергию — и выигрыш не разовый эффект, а накапливается день за днём.

То, что лежит здесь как замороженное референсное исследование, можно проследить на интерактивном пульте (texni.dev) на том же снапшоте.



Результат $-18,4\% \cdot 249,75\text{ €} \cdot 89\text{ дней} \cdot 1359,08\text{ €} \rightarrow 1109,32\text{ €}$

А Архитектура

Сборка трёхфазная и детерминированная — из тех же исходных данных получается побайтово то же самое досье.

Доступ к сети и языковая модель работают ровно один раз и записываются в замороженные сайдкары. Вычислительная часть не знает часов — никакого wall-clock, никакого источника случайности без зерна. Пересборка заново считает всё ML и выдаёт тот же бандл, байт за байтом (проверено).

- 1

Ingest
сеть, однократно → снапшот + происхождение
- 2

Compute
чисто: ряд → признаки → ML → LP → Model Card
- 3

AI-Capture
Qwen, однократно → заморожено
- 4

Assemble
чисто → Досье (v0.2)

В Model Card

Честные показатели, раскрытые границы — полная карта модели.

Целевая величина: цена электроэнергии day-ahead (€/МВт·ч), зона DE/DE-LU. Модель: HistGradientBoosting (точка + квантили) и классификатор для P(цена < 0). Бэкстест: walk-forward, расширяющийся, с ежедневным дообучением.

МЕТРИКИ (БЭКТЕСТ)

MAE	16,77 €/MWh
RMSE	29,97 €/MWh
WAPE	15,7 %
Базис плоский	51,91 €/MWh
Базис персистентность-24 ч	31,03 €/MWh

ПЕРМУТАЦИОННАЯ ВАЖНОСТЬ

vre_share		0,392
residual_load_mw		0,198
temperature_c		0,038
dow		0,014
lag_168		0,012
is_holiday		0,010

Границы Демонстрация портфолио, не продуктивная система. Одна модельная площадка, фиксированные допущения (COP, идеальная тепловая модель, ценополучатель). Без гарантии переносимости.

C Модель оптимизации

Сердце решения — сформулировано как линейная программа.

Переменная решения — холодильная мощность за час. Минимизируются затраты на электроэнергию при термодинамике камеры, температурном коридоре и присоединённой мощности. Терминальное условие отделяет настоящую выгоду арбитража от простого выхолаживания.

ЦЕЛЕВАЯ ФУНКЦИЯ

$$\min_u \sum_{h=0}^{23} p_h \cdot u_h / \eta$$

ТЕРМОДИНАМИКА КАМЕРЫ

$$T_{h+1} = T_h + (k(T_{\text{amb}} - T_h) - \eta u_h) \cdot \Delta t / C$$

ТЕМПЕРАТУРНЫЙ КОРИДОР

$$T_{\min} \leq T_h \leq T_{\max}$$

ПРИСОЕДИНЁННАЯ МОЩНОСТЬ

$$0 \leq u_h \leq P_{\max}$$

ТЕРМИНАЛЬНОЕ — ЧИСТЫЙ АРБИТРАЖ

$$T_{24} = T_0$$

u_h Холодильная мощность в час h (кВт) · $C = 20 \text{ kWh/}^\circ\text{C}$ · $P_{\max} = 50 \text{ kW}$ · $\text{COP} = 2,5$ · Температурный коридор $-20 \dots -18 \text{ }^\circ\text{C}$ · $k = 0,5 \text{ kW/}^\circ\text{C}$

Решено через `scipy.linprog`. Терминальное условие возвращает к концу суток исходное состояние — измеряется арбитраж, а не выхолаживание.

D Воспроизводимость и границы

Что это досье доказывает — а что нет.

49 модульных тестов и приёмочные проверки с проверкой значений страхуют цепочку; пересборка побайтово совпадает. У всех источников данных указана лицензия (в т. ч. Open-Meteo/DWD CC-BY 4.0).

Границы, названные прямо: это референсное исследование на модельном холодильном складе, а не внедрение у клиента. Модель — демонстрация портфолио. Цифры действительны для показанного окна и принятых допущений — это доказательство метода и глубины, а не обещание для конкретного производства.

Колофон

СНАПШОТ c3badce30b4aca78
СХЕМА reise · v0.2.0
ОКНО 2026-04-02 – 2026-07-01 · 2184 h · 91 дней
СГЕНЕРИРОВАНО ИЗ beweismappe.reise.json

Детерминированная сборка — воспроизводима побайтово.

Вёрстка: Typst · Шрифты: Stack Sans Notch, Golos Text, Libertinus Serif · Графика: нативные векторы.

texni.dev · Один оператор, полный стек.