

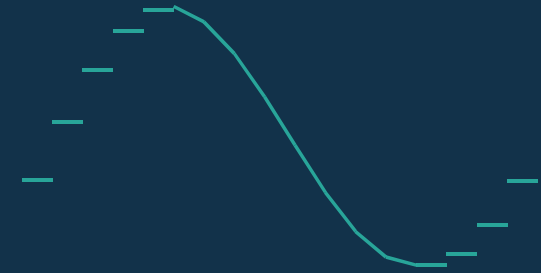
2026

Техническое задание на технологическую задачу

ML-прогнозирование и оптимизация почасовых отклонений ПЛАН / ФАКТ при работе на оптовом рынке электрической энергии Республики Казахстан

БРЭ · почасовые дисбалансы · генерация/потребление

ПО / ИС · AI / ML · Big Data



Цель: сократить финансовые последствия дисбалансов за счет точного прогноза и риск-ориентированного графика.

1. Цель и ожидаемый результат

Фокус проекта — управляемое снижение почасовых отклонений и стоимости дисбалансов.

–15–30%
целевое снижение
WAPE/MAE к базовой
модели на пилоте

24×7
автоматический
пересчет прогнозов и
мониторинг качества

1–24 ч
горизонт оперативного
планирования и
корректировок

API + UI
интеграция с АСКУЭ,
ERP и торговыми
системами

Бизнес-результат

Бизнес-результат

Планирование графика с учетом прогнозного распределения, технических ограничений объекта и ожидаемых цен дисбалансов. На выходе — почасовой план, объяснение причин отклонений и сценарии корректировки.

Технологический результат

Технологический результат

Модульная ИС: витрина данных, feature store, набор моделей прогноза, оптимизатор графика, дашборд диспетчера и автоматизированный контур мониторинга моделей.

1
1
Измерить
baseline План/Факт и стоимость

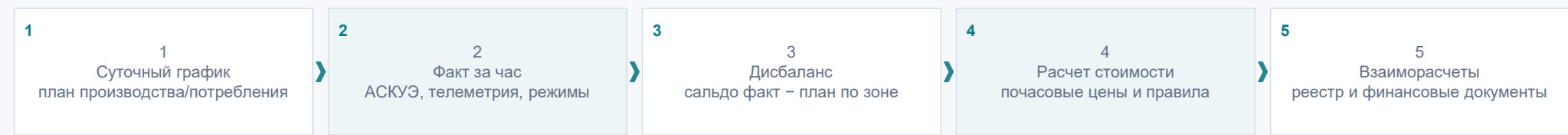
2
2
Спрогнозировать
потребление, генерацию, сальдо

3
3
Оптимизировать
план с учетом риска и ограничений

4
4
Контролировать
факт, алерты, ретрейнинг

2. Контекст БРЭ: почему задача важна

Оплата дисбалансов основана на почасовых данных план/факт и расчетах РЦ БРЭ.



Нормативная логика

Нормативная логика
Правила БРЭ определяют порядок функционирования рынка, расчет почасовых объемов балансирующей электроэнергии и дисбалансов, а также порядок формирования реестра взаимозачетов.

Операционный процесс

Операционный процесс
РЦ БРЭ рассчитывает почасовые объемы и стоимость дисбалансов на основании первичных данных системного оператора; результаты публикуются на официальном информационном ресурсе.

Элемент	Что рассчитывается	Почему влияет на ТЗ	Требование к системе
План/факт	почасовые значения генерации и потребления	формирует основу дисбаланса	хранить историю ≥ 24 мес.
Зона балансирования	отдельный расчет по зоне	цена и знак дисбаланса зависят от зоны	учет текущей зоны объекта
Цена/коэффициенты	стоимость дисбаланса по часам	важен не только объем, но и цена часа	оптимизация по стоимости
Реестр	итоговые денежные обязательства	финансовый результат	аудит и сверка расчетов

3. Проблема: почасовые отклонения ПЛАН / ФАКТ

Причины отклонений разнородны, поэтому нужна не одна модель, а контур прогноз + оптимизация + контроль.

Непредсказуемость нагрузки

Непредсказуемость нагрузки
смены, температура, технологический режим, календарь, аварийные простои

ВИЭ / погодозависимая генерация

ВИЭ / погодозависимая генерация
ветер, солнце, облачность, краткосрочная волатильность

Данные и задержки

Данные и задержки
разные источники, пропуски, округления, расхождения в часовых поясах

Цена риска

Цена риска
одинаковая ошибка в кВт·ч может иметь разную стоимость в разные часы



Ключевая гипотеза проекта

Ключевая гипотеза проекта

Если прогнозировать не только точечное значение, но и диапазон неопределенности, а затем выбирать план с учетом цены риска, можно снизить как физический объем отклонений, так и их денежную стоимость.

4. Объекты прогнозирования и решения

Система должна работать на уровне объекта, зоны балансирования и портфеля субъекта БРЭ.

Объект	Горизонт	Выход модели	Частота	Роль в решении
Потребление	1–48 часов	кВт·ч + интервал 10/50/90%	ежечасно	минимизация недобора/перебора
Генерация	1–48 часов	кВт·ч + вероятность отклонения	ежечасно	суточный график и корректировки
Сальдо объекта	1–24 часа	генерация – потребление	ежечасно	расчет риска дисбаланса
Портфель	1–24 часа	агрегированный график	ежечасно	балансировка объектов между собой
Цена риска	текущий/след. день	ожидаемая стоимость ошибки	по доступности данных	оптимизация не только по объему
Аномалии	онлайн	флаг сбоя/скачка	15–60 мин	алерты и контроль качества

Функциональный минимум MVP

Функциональный минимум MVP
1) прогноз потребления/генерации; 2) расчет ожидаемого дисбаланса; 3) рекомендация планового графика; 4) мониторинг факта; 5) отчет по стоимости и причинам отклонений.

Расширение после пилота

Расширение после пилота
Портфельная оптимизация, интеграция с торговой системой, сценарии “что если”, прогноз цен/коэффициентов, автогенерация обоснований для диспетчера.

5. Требования к данным

Качество прогноза определяется полнотой исторических рядов и дисциплиной актуализации производственных факторов.

Источник данных	Состав	Гранулярность	История	Критичность
АСКУЭ / счетчики	факт генерации и потребления	15/30/60 мин → час	≥ 24 мес.	Высокая
Суточный график	план по объектам и зонам	час	≥ 24 мес.	Высокая
Справочники объектов	мощность, зона, тип, ограничения	событие	актуальная версия	Высокая
Ремонты и простои	плановые/аварийные ограничения	час/день	≥ 12 мес.	Средняя
Метеоданные	температура, ветер, солнце, облачность	час	≥ 24 мес.	Высокая для ВИЭ
Производственный календарь	выходные, праздники, смены	день/час	≥ 24 мес.	Средняя
Цены/расчеты БРЭ	почасовые дисбалансы и стоимость	час	≥ 12 мес.	Высокая
Журналы событий	аварии, ручные корректировки, комментарии	событие	≥ 12 мес.	Средняя

Data Quality Gates

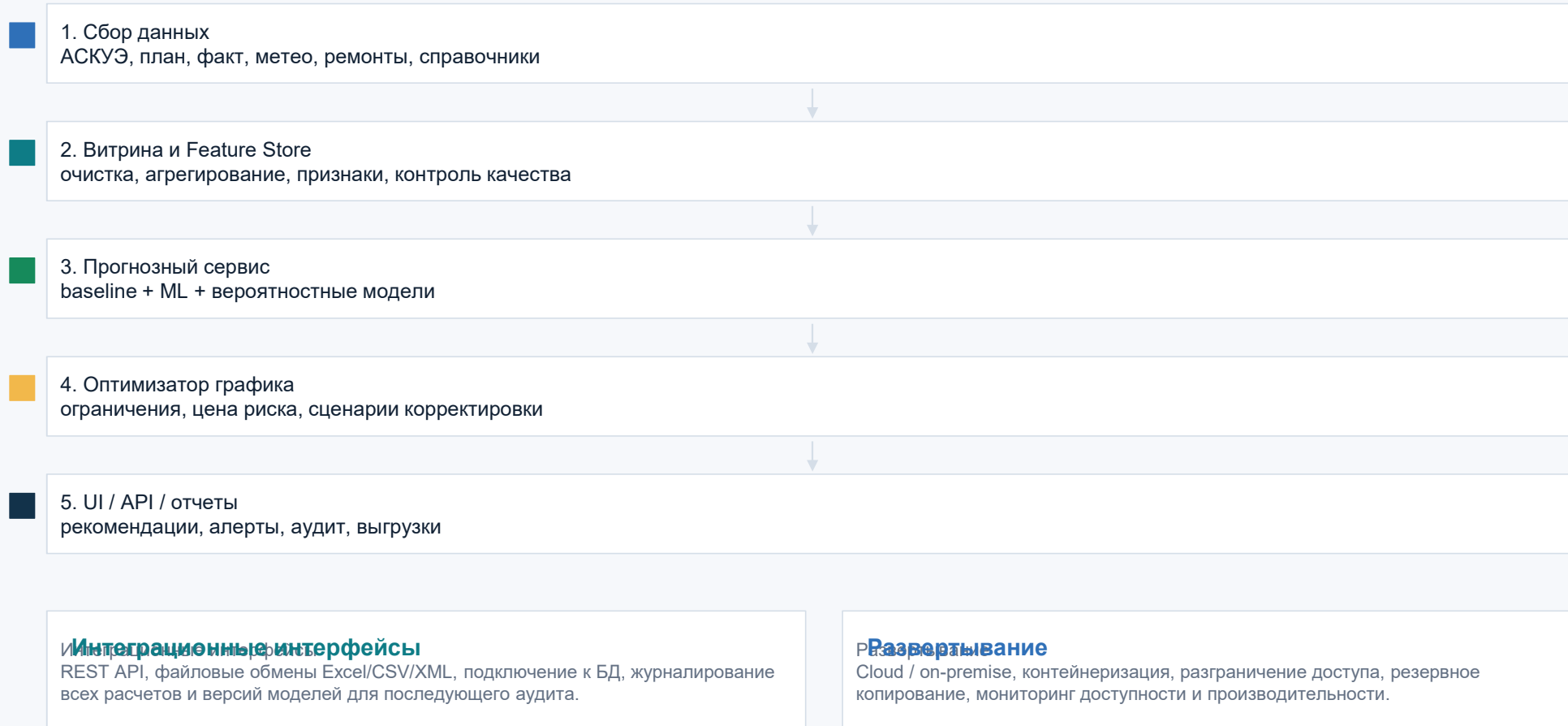
Data Quality Gates
Автопроверки: пропуски, дубли, выбросы, отрицательные значения, неверный часовой пояс, расхождение агрегатов с почасовыми суммами, задержка публикации.

Целевой SLA данных

Целевой SLA данных
Поступление факта не позднее T+30 минут для оперативного мониторинга; полная сверенная версия — по регламенту расчета после расчетного периода.

6. Целевая архитектура решения

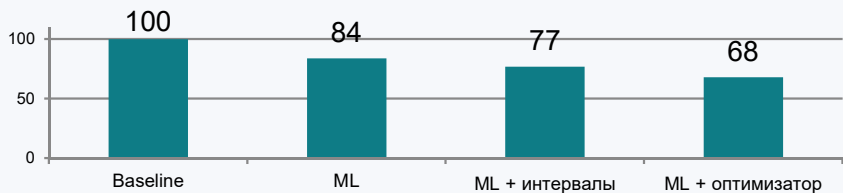
Модульная архитектура позволяет стартовать с пилота и масштабироваться на портфель объектов.



7. Модельный контур: варианты ML и не-ML

Решение должно сравнивать несколько подходов и выбирать лучший по данным конкретного объекта.

Подход	Когда применять	Плюсы	Ограничения	Роль
Правила / baseline	слабая история, регулярный режим	быстрый старт и контроль	плохо ловит аномалии	точка сравнения
SARIMAX / ETS	стабильная сезонность	понятная статистика	сложнее с внешними факторами	резервная модель
CatBoost / LightGBM	табличные признаки, метео, календарь	высокая точность, объяснимость	требуется feature engineering	основной ML
TFT / LSTM / N-BEATS	много объектов и длинная история	ловит сложные зависимости	требуется данных и MLOps	масштабирование
Квантильные модели	важна неопределенность	прогноз диапазонов риска	требуется калибровки	оптимизация стоимости
Оптимизация MILP/LP	есть ограничения и цена риска	выбирает допустимый график	зависит от правил бизнеса	финальный план



Принцип приемки моделей

Принцип приемки моделей
Побеждает не "самая сложная" модель, а решение, которое стабильно снижает ошибку и стоимость на backtest без утечки будущих данных.

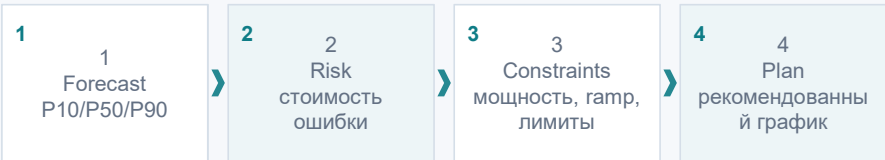
8. Оптимизация графика: от прогноза к решению

План должен минимизировать не только среднюю ошибку, но и ожидаемую стоимость риска.

Целевая функция

Целевая функция
 $\min \sum_h E[\text{Cost}_h(\text{Plan}_h - \text{Fact}_h)]$ + штрафы за нарушение ограничений

где Cost_h учитывает знак дисбаланса, цену/коэффициент часа, зону и допустимые диапазоны.



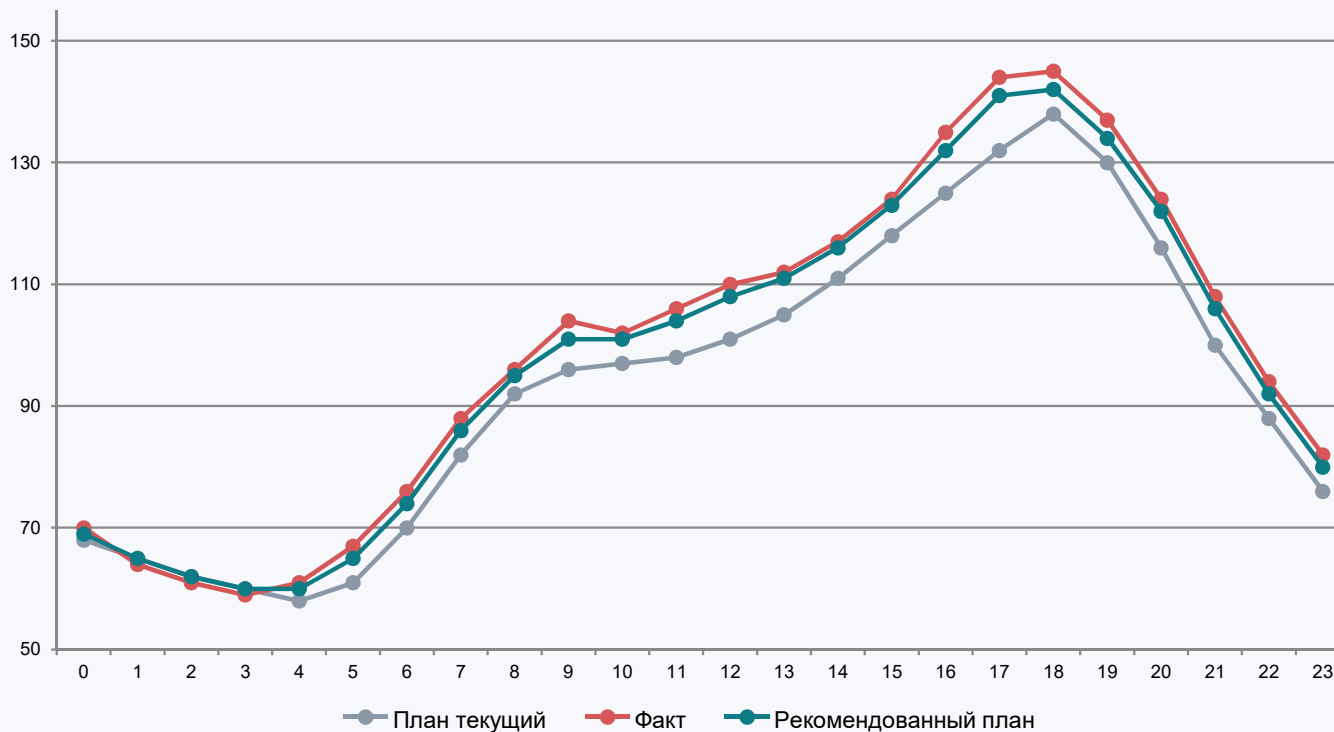
Ограничение	Описание	Источник	Проверка
Мощность объекта	Pmin/Pmax, доступная мощность	паспорт, диспетчер	жесткое
Скорость изменения	ramp-up / ramp-down	техкарта	жесткое/мягкое
Ремонт/простой	запрет или снижение режима	журнал событий	жесткое
Портфель	агрегация по объектам и зоне	справочник	жесткое
Риск дисбаланса	макс. ожидаемая стоимость часа	модель/БРЭ	мягкое

Выход оптимизатора

Выход оптимизатора
План по часам, доверительный диапазон, ожидаемый дисбаланс, ожидаемая стоимость, причина рекомендации и список часов с высоким риском.

9. Пример: почасовой ПЛАН / ФАКТ и оптимизированный план

Иллюстрация показывает, как рекомендация сужает отклонение в пиковые часы.



Что видно на графике

Что видно на графике

- Ошибка концентрируется в утреннем и вечернем пике.
- ML-прогноз смещает план ближе к факту.
- Оптимизация учитывает риск и ограничения, поэтому план не равен слепому P50.

Показатели примера

Показатели примера

WAPE: 7,1% → 3,2%

Max $|\Delta|$: 14 → 4 МВт·ч

Риск-часов: 6 → 2

10. Метрики качества и критерии приемки

Приемка проводится на историческом backtest и на пилотной эксплуатации.

Метрика	Формула / смысл	Разрез	Цель пилота	Метод проверки
MAE, RMSE	средняя и квадратичная ошибка	объект, зона, час	лучше baseline	rolling backtest
WAPE	$\Sigma \text{Факт}-\text{План} / \Sigma\text{Факт}$	месяц, час, тип дня	-15-30% к baseline	контрольная выборка
Cost Saving	снижение ожидаемой стоимости	месяц, зона	-10-25% к baseline	replay расчетов
P90 Calibration	покрытие факта интервалом	объект/час	85-95%	probability check
High-risk Hours	количество часов выше порога	день/неделя	снижение $\geq 20\%$	пороговая аналитика
SLA API	время ответа прогноза	endpoint	< 3 сек на объект	нагрузочный тест
Data SLA	задержка поступления факта	источник	T+30 мин для мониторинга	журнал загрузок

Правило сравнения

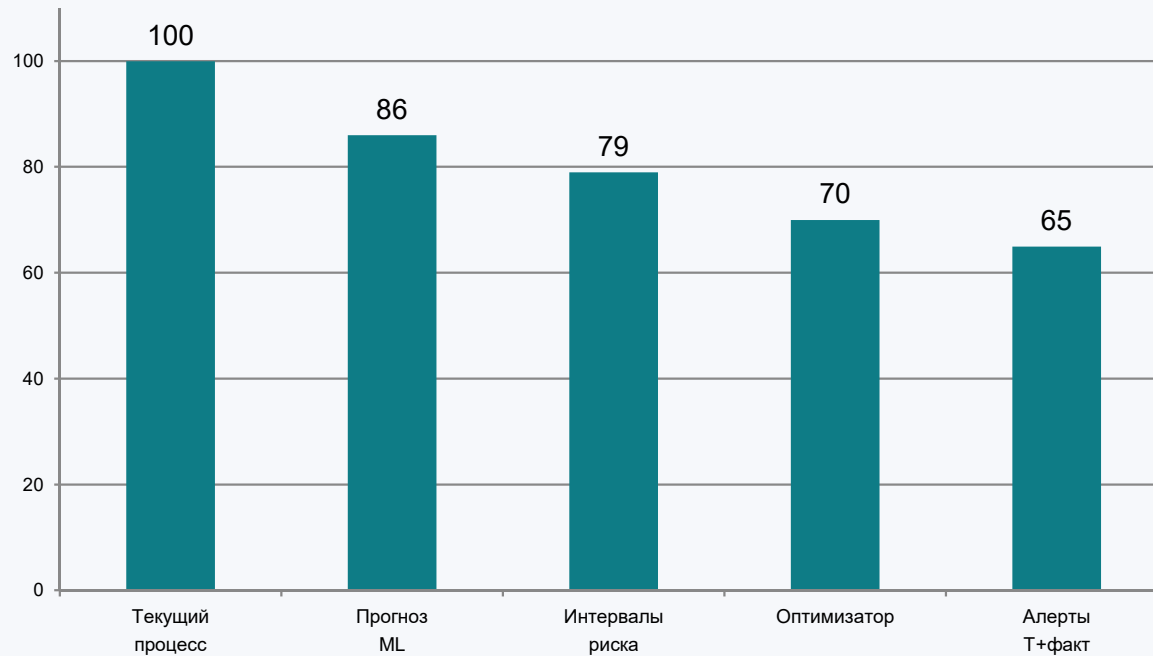
Правило сравнения
Baseline фиксируется до запуска ML: “как сейчас” + наивные сезонные модели.
Улучшение считается только на out-of-sample периодах без подглядывания в будущее.

Условие промышленного запуска

Условие промышленного запуска
Пилот считается успешным при выполнении минимум трех критериев: ошибка, стоимость, SLA данных/API, качество объяснений и приемка диспетчерами.

11. Ожидаемый экономический эффект

Эффект считается по фактической истории: replay “как было” vs. “как было бы с рекомендациями”.



Как считать эффект

Как считать эффект

1. Взять историю план/факт и расчетов БРЭ.
2. Воспроизвести прогнозы в режиме “как в тот день”.
3. Применить оптимизатор и ограничения.
4. Сравнить стоимость по часам и месяцам.

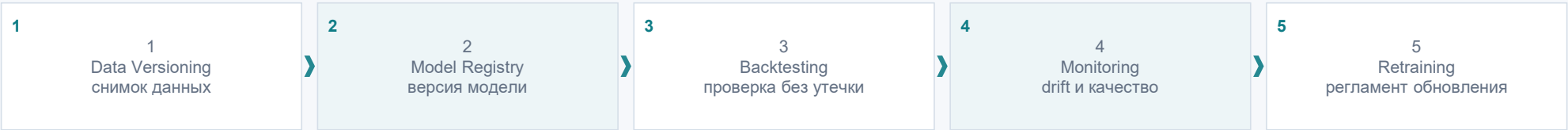
Где появляется экономия

Где появляется экономия

- меньше объем дисбаланса;
- ниже доля дорогих риск-часов;
- меньше ручных корректировок;
- выше прозрачность причин отклонений.

12. MLOps, надежность и безопасность

Система должна быть воспроизводимой: каждый прогноз и план привязан к данным, модели и версии правил.



Контроль	Требование	Событие тревоги	Ответственный
Data drift	сравнение распределений признаков	дрейф > порога 7 дней	Data Engineer
Model drift	ошибка хуже baseline	WAPE растёт 3 дня	ML Engineer
Audit trail	лог данных/модели/плана	нет версии расчета	Product Owner
Security	RBAC, SSO, шифрование	неавторизованный доступ	Администратор
Availability	мониторинг API и БД	SLA < 99%	DevOps

Критично для БРЭ

Любой план и рекомендация должны быть объяснимы и воспроизводимы: входные данные, версия модели, параметры оптимизации, пользовательское действие.

13. Риски, зависимости и меры снижения

Главные риски проекта связаны с доступностью данных, регуляторной корректностью и доверием пользователей.

Риск	Проявление	Вероятность/влияние	Митигирующие меры
Недостаточная история	модель не обучается на редких событиях	Сред / Выс	baseline + правила + постепенное накопление данных
Качество факта	пропуски, задержки, корректировки	Выс / Выс	data quality gates и статус “черновик/сверено”
Изменение правил БРЭ	формулы и коэффициенты меняются	Сред / Выс	конфигурационный модуль правил, юридическая проверка
Недоверие диспетчеров	рекомендации не используются	Сред / Выс	объяснимость, A/B режим, журнал причин
Интеграционные барьеры	нет API или доступов	Сред / Сред	поддержка файловых обменов и ручной загрузки
Кибербезопасность	доступ к коммерческим данным	Низ / Выс	RBAC, аудит, шифрование, сегментация

Ключевая зависимость

Ключевая зависимость
Пилот начинается только после подтверждения: перечня объектов, периода истории, формата данных план/факт, доступности расчетов БРЭ и согласованной методики оценки эффекта.

14. Итоговое техническое задание: состав работ и результаты

Финальная формулировка задачи для команды разработки, бизнеса и пилотной приемки.

Блок ТЗ	Содержание работ	Результат	Критерий приемки
Аналитика и данные	инвентаризация источников, data quality, baseline	единая витрина	покрытие истории и DQ отчет
Прогнозирование	модели потребления, генерации, сальдо, интервалов	model service	ошибка ниже baseline
Оптимизация	целевая функция стоимости, ограничения, сценарии	рекомендованный план	экономический replay
Интерфейс	дашборды, алерты, выгрузки, объяснения	web UI/API	приемка пользователями
MLOps	мониторинг, ретрейнинг, версия данных/моделей	эксплуатационный контур	SLA и аудит
Пилот	тест на 1–3 объектах/зонах, сравнение с baseline	pilot report	решение о масштабировании

Рекомендуемый next step

Рекомендуемый next step
Утвердить список пилотных объектов, собрать 24 месяца план/факт и расчетов БРЭ, провести 2-недельную диагностику качества данных и baseline-ошибки.

Готово для публикации как технологическая задача