

Robozon: аналитическая модель

Команда Следующий уровень

July 19, 2026

CONTENTS

Robozon: аналитическая модель сортировочного центра	.....
Резюме	.....
1. Какую задачу мы решаем	.....
1.1. Критерий успеха	.....
1.2. Почему нельзя ограничиться делением потока на мощность	.....
2. Исходные данные и граница модели	.....
2.1. Что задано организатором	.....
2.2. Где начинается и заканчивается модель	.....
2.3. Инженерные допущения	.....
3. Предлагаемая схема центра	.....
3.1. Основной поток	.....
3.2. Вспомогательные потоки	.....
3.3. Управляющее правило	.....
3.4. Почему выбрана балансировка	.....
3.5. Люди и автоматизация	.....
4. Аналитическая модель мощности	.....
4.1. Пересчет потока	.....
4.2. Ворота отгрузки	.....
4.3. Сколько нужно сортировочных линий	.....
5. Как устроена имитационная модель	.....
5.1. Что означает DES	.....
5.2. Уровень детализации	.....
5.3. Что измеряется	.....
5.4. Прогрев и рабочее окно	.....

5.5. Проверки корректности

6. Рабочий сценарий

6.1. Условия опыта

6.2. Итоговые показатели

6.3. Где остается мало запаса

6.4. Почему среднее нужно дополнять графиком

6.5. Загрузка отдельных линий

7. Сценарии, которые меняют решение

7.1. Где объединяются товары одного направления

7.2. Смена выходного КТЯ

7.3. Ошибки и повреждения

7.4. Отказ одной линии

8. Случайность и Монте-Карло

8.1. Зачем повторять один сценарий

9. Площадь и компоновка

9.1. Как считается площадь

9.2. Результат

9.3. Инженерная план-схема

9.4. 3D-план штатной конфигурации

9.5. Что проверить перед рабочим проектом

10. Что рекомендует модель

10.1. Рабочая конфигурация

10.2. Что именно доказано

10.3. Что пока не доказано

10.4. Следующие проверки

10.5. Экономическая рамка

11. Воспроизводимость

11.1. Что нужно для повторения

11.2. Команды

12. Трассировка требований

Заключение

Приложение А. Файлы исходных результатов

Приложение Б. Ограничения интерпретации

Robozon: аналитическая модель сортировочного центра

Команда «Следующий уровень»

Евграфов Вадим, тимлид (@vadim_evgrafov)

Евграфова Ирина (@irina_evgrafova0)

Белгород, 2026

Резюме

Перед нами стояла практическая задача: предложить схему сортировочного центра, которая принимает 100 000 сортируемых товаров в час, распределяет их по 400 направлениям и передает в отгрузку в пределах суток. Одной суммы паспортных мощностей для ответа недостаточно. В реальном процессе товары ждут свободный ресурс, КТЯ заполняются с разной скоростью, палеты копятя до рейса, а отказ одной линии влияет на участки после нее.

Мы построили две связанные модели. Аналитический расчет проверяет порядок величин и показывает необходимое число ресурсов. Дискретно-событийная модель, или DES, воспроизводит движение КТЯ, товаров и палет во времени. Она нужна, чтобы проверить очереди, буферы, загрузку отдельных линий и сквозной выход.

Главный результат работы такой:

- основной сортировщик выбран не условно: **Interroll MX-Vs Vertical Crossbelt Sorter** имеет публично заявленный предел до 10 000 товаров/ч на линию; двенадцать таких линий дают 120 000 товаров/ч номинально;
- десять линий по 10 000 товаров/ч дают ровно 100 000 товаров/ч только на бумаге. Поэтому штатная схема использует 12 линий с расчетной загрузкой 83,3%, а для строгого N+1 потребуется 13-я линия;
- после заклейки КТЯ проходит отдельный конвейерный узел **Interroll MultiBelt Switch BM 1300** и сводится в восемь групп рейсов; он не подменяет основную сортировку на 400 направлений;
- в 24-часовом рабочем окне модель с общей консолидацией выходных КТЯ сортирует 99 350 товаров/ч и передает в отгрузку 99 450 товаров/ч;
- среднее сквозное время КТЯ составляет 40,3 мин, 95% КТЯ проходят центр не дольше 60,5 мин;
- отгрузка работает с загрузкой 95,9%. Это один из самых напряженных участков, но при 24 воротах расчетная пропускная способность остается достаточной;

- расчетная площадь составляет 23 445 м² и попадает в типовой ориентир 20-24 тыс. м² при явно названных допущениях компоновки.

Последний пункт важен. Модель подтверждает работоспособность потока и даёт планировочную оценку, но не заменяет рабочий проект. Производитель публикует предельную производительность и длину MX-Vs, но не готовую схему центра на 400 направлений. Поэтому проектная ширина линии, общий накопитель и зоны подачи отдельно названы инженерными допущениями. Наша рекомендация состоит из двух частей:

1. принять 12 линий и политику балансировки как рабочую конфигурацию по производительности;
2. перед детальным проектированием подтвердить у поставщика ширину линии, сервисные зоны и схему объединяющих конвейеров. Для строгого резерва N+1 при загрузке не выше 85% потребуется 13 линий и дополнительная площадь. Здесь N+1 означает сохранение расчетного режима после отказа одной линии.

Таким образом, модель решает поставленную задачу не красивой итоговой цифрой, а проверяемым инженерным ответом: показывает работоспособную конфигурацию, цену ее резерва и параметр, который сейчас мешает окончательно подтвердить норматив площади.

1. Какую задачу мы решаем

1.1. Критерий успеха

Цель проекта сформулирована как проверяемое условие:

Сортировочный центр должен устойчиво принимать 100 000 сортируемых товаров в час, распределять их по 400 направлениям, формировать исходящие КТЯ и палеты, не создавать неограниченно растущих очередей и отгружать поступивший поток в пределах 24 часов.

Слово «устойчиво» здесь принципиально. Если в течение короткого опыта центр обработал накопленный запас, это еще не означает, что он выдерживает такой поток постоянно. Для устойчивого режима средний выход должен соответствовать входу, а незавершенная работа не должна расти из часа в час.

Мы считаем решение успешным, если одновременно выполняются четыре условия:

Условие	Как проверяется
Пропускная способность	Сортировка и сквозной выход близки к 100 000 товаров/ч
Срок	Товары и КТЯ покидают центр не позднее 24 часов
Устойчивость	Очереди и незавершенная работа не растут без ограничения
Реализуемость	Число линий, ворот, буферов и площадь имеют явное обоснование

1.2. Почему нельзя ограничиться делением потока на мощность

Простой расчет $100\ 000 / 10\ 000 = 10$ отвечает только на вопрос о номинальной мощности сортировщиков. Он не учитывает:

- остановки оборудования и смену заполненного КТЯ на пустой;
- неравномерность 400 направлений;
- повторное считывание и ручной разбор исключений;
- накопление КТЯ до полной палеты и ожидание рейса;
- ограничение палетизации и ворот отгрузки;
- пустой старт системы и остаток незавершенной работы в конце наблюдения.

Поэтому в проекте есть аналитический слой и имитация. Первый не дает модели скрыть ошибку в единицах или балансе. Вторая показывает поведение связанной системы во времени.

2. Исходные данные и граница модели

2.1. Что задано организатором

Основными источниками служат PDF постановки задачи, PDF критериев и более поздний официальный файл вопросов и ответов `case/doptask.md`. Если позднее уточнение сужает или поясняет исходную формулировку, в модели используется уточнение.

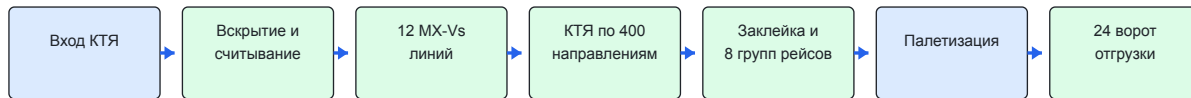
Параметр	Значение	Роль в расчете
Сортируемый поток	100 000 товаров/ч	Требуемый вход модели
Направления	400	Разделение выходного потока
Среднее заполнение входного КТЯ	27 товаров	Пересчет товаров в КТЯ
КТЯ на палете	20	Пересчет КТЯ в палеты
Повторное использование КТЯ	80%	Возврат тары и потребность в новой
Отбраковка КТЯ	20%	Поток картона и новой тары
Ворота отгрузки	24	Ресурс исходящего контура
Палеты с КТЯ в машине	16	Полезная вместимость для сортируемого потока
Полный цикл машины у ворот	2 часа	Пропускная способность ворот
Срок обработки	до 24 часов	SLA, то есть требуемый срок обслуживания
Типовой ориентир площади	20 000-24 000 м ²	Проверка компоновки

Поток 100 000 товаров/ч относится к товарам, которые идут в автоматическую сортировку. Nonsort, то есть крупногабаритные товары вне автоматической сортировки, показан как соседний внешний поток. Мы не добавляем его второй раз к 100 000 товаров/ч. По уточнению организаторов до 16 из 32 мест исходящей машины могут занимать ролл-кейджи, но их вместимость в товарах не задана. Поэтому модель считает подтвержденные 16 палетных мест sort-потока и не придумывает «ролл-кейджи в час».

2.2. Где начинается и заканчивается модель

Граница и основной поток модели

Цель: проверить, проходит ли поток 100 000 товаров/ч через весь контур до отгрузки



Вспомогательные контуры: повторное считывание, ручные исключения, возврат и замена КТЯ, накопление по рейсам.

Nonsort остается внешним смежным потоком: численно он не прибавляется к подтвержденным 100 000 sort-товаров/ч.

Модель начинается на входе КТЯ в сортировочный блок. Входные ворота, разгрузка машин и внутреннее устройство nonsort-блока находятся за ее границей. Это соответствует официальному уточнению и не отвлекает расчет от основного вопроса: может ли сортировочный блок обработать заданный сортируемый поток.

На выходе модель заканчивается фактом отгрузки палеты через ворота. Внутри границы связаны все операции от вскрытия КТЯ до формирования рейсов. Если палета была собрана после завершения 24-часового окна, она учитывается в остатке, а не в показателе сквозного выхода этого окна.

2.3. Инженерные допущения

Организатор намеренно оставил часть параметров открытой. Мы не маскируем их под исходные данные.

Допущение	Принятое значение	Зачем нужно	Как влияет на вывод
Число линий	12	Рабочая конфигурация	Определяет резерв и площадь
Основной сортировщик	Interroll MX-Vs Vertical Crossbelt Sorter	Открытые характеристики можно проверить	Ограничивает линию 10 000 товаров/ч
Габарит линии на плане	90 м x 5 м проектного шага	90 м — открытый предел MX-Vs; шаг выбран командой	Определяет 5 400 м² двенадцати линий
Накопитель направлений	400 активных ячеек x 1,2 м²	Реализует общее накопление	Добавляет 480 м² и снижает частичные КТЯ
Сведение после заклейки	Interroll MultiBelt Switch BM 1300, 8 групп рейсов	Отделяет рейсовую логику от 400 направлений	Отдельная DES-операция и буфер рейсов
Коэффициент вариации времени	0,25	Неравномерность операций	Формирует разброс и очереди
Первичное считывание	98%	Нет статистики штрихкодов	Нагрузка повторного контура
Максимальное ожидание выходного КТЯ	1 час	Закрытие холодных направлений	Заполнение КТЯ и срок
Смена выходного КТЯ	8 секунд	Нет паспортного времени	Загрузка механизма смены
Расписание рейсов	8 групп, интервал 40 минут	Реальное расписание не дано	Ожидание и буфер рейса
Внутреннее перемещение	0,75 минуты	Укрупненная логистика	Сквозное время

Паспортные пределы MX-Vs и MultiBelt Switch проверяются кодом: сценарий не может задать производительность выше опубликованного максимума. Проектный шаг, ячейки и зоны индукции — допущения, их можно менять, но тогда нужно повторить расчёт, а не «подправлять» результат вручную.

Открытые источники: [Interroll MX-Vs Vertical Crossbelt Sorter](#) и [Interroll MultiBelt Switch BM 1300](#). Полная таблица «факт источника / решение команды» приведена в [docs/equipment/sorters.md](#).

3. Предлагаемая схема центра

3.1. Основной поток

Палета поступает на границу сортировочного блока и разбирается на 20 КТЯ. После вскрытия КТЯ товары идентифицируются и подаются на одну из параллельных линий. Политика балансировки выбирает линию с меньшей текущей нагрузкой.

Каждому товару уже назначено одно из 400 логических направлений. Проект не пытается заменить внешнюю систему управления складом (WMS) или систему управления оборудованием. Его задача другая: проверить, что физический контур способен выполнить готовые назначения с требуемой скоростью.

На выходе товары одного направления накапливаются в общем массиве из 400 активных ячеек КТЯ. Полный КТЯ снимается, заменяется пустым и заклеивается. После этого он проходит MultiBelt Switch, попадает в одну из восьми групп рейсов, ждёт отправления, собирается по 20 штук на палете и передаётся через одно из 24 ворот.

3.2. Вспомогательные потоки

Основной поток не может работать без тары и обработки исключений:

- КТЯ с нечитаемым кодом проходит повторное считывание;
- оставшиеся исключения направляются на ручной разбор;
- 80% входных КТЯ возвращаются в оборот;
- 20% поврежденных КТЯ уходят в поток картона и заменяются новыми;
- частично заполненные выходные КТЯ закрываются по ограничению времени, чтобы редкое направление не нарушило срок отгрузки;
- палеты ждут подходящего рейса в отдельном буфере.

Эти контуры включены не ради детализации. Они потребляют ресурсы и площадь, поэтому могут изменить ответ на главный вопрос о работоспособности центра. В контрольном прогоне на повторное считывание отводится 2,0% входных КТЯ, а до ручного разбора доходит 0,4%. Это отдельный контур обработки, а не безвозвратная потеря товаров: после успешной идентификации КТЯ возвращается в основной поток.

3.3. Управляющее правило

Мы рассматриваем процесс как цепочку решений. В каждой точке система выбирает действие по текущему состоянию:

1. на какую линию направить следующую работу;
2. отправить КТЯ на повторное считывание или ручной разбор;
3. ждать полного КТЯ или закрыть его по времени;
4. продолжать формирование палеты или закрыть ее к рейсу;
5. какие ворота использовать для готовой палеты.

В рабочем сценарии используется политика балансировки. Она не увеличивает паспортную мощность оборудования. Ее польза в том, что горячие направления не перегружают отдельные линии, пока другие простаивают.

3.4. Почему выбрана балансировка

Мы сравнили три правила на одинаковом 24-часовом сценарии:

Политика	Сортировка, товаров/ч	Сквозной выход, товаров/ч	Среднее время, мин	Площадь, м ²
Закрепление по направлениям	40 301	40 266	461,6	43 077
Приоритет ближайшего рейса	99 343	99 399	40,0	23 434
Балансировка нагрузки	99 350	99 450	40,3	23 445

Закрепление направлений за линиями выглядит простым, но при распределении 80/20 создает сильный перекос. Горячие направления перегружают свои линии, пока часть общей мощности остается свободной. Результат падает примерно до 40 тыс. товаров/ч, растут очереди и площадь буферов.

Приоритет ближайшего рейса и балансировка дают близкую сквозную производительность. Приоритет рейса закрывает часть КТЯ раньше: среднее заполнение составляет 26,96 товара, доля частичных КТЯ - 1,83%. Балансировка в контрольном опыте сохраняет полное среднее заполнение 27 товаров и ровную загрузку линий. Поэтому она выбрана как основное правило, а приоритет рейса остается рабочей альтернативой для сценария с жестким расписанием.

3.5. Люди и автоматизация

Операция	Человек в смену	Расчетная загрузка	Характер участка
Депаллетизация	6	77,2%	Автоматизированный/ассистированный
Вскрытие КТЯ	14	88,2%	Ручная операция
Подача на сортировку	44	90,9%	Автоматизированный/ассистированный
Контроль и исключения	8	62,5%	Ручная операция
Заклейка КТЯ	10	92,6%	Автоматизированный/ассистированный
Палетизация	8	77,2%	Автоматизированный/ассистированный

Расчет дает 90 человек на смену для перечисленных операций. Для полностью ручной двухстадийной сортировки по нормативу организатора потребовалось бы около 800 человек. Снижение по этому сравнению составляет 88,8%.

Это не штатное расписание готового центра. В оценку не входят руководители, ремонт, уборка, охрана, водители техники и резерв на отсутствия. Нормы подачи, заклейки и палетизации являются инженерными допущениями. Раздел показывает порядок численности и участки с высокой загрузкой; перед внедрением их нужно проверить хронометражом и требованиями выбранного оборудования.

4. Аналитическая модель мощности

4.1. Пересчет потока

Средний поток входных КТЯ:

$$100\ 000 \text{ товаров/ч} / 27 \text{ товаров в КТЯ} = 3\ 703,7 \text{ КТЯ/ч}$$

Средний поток исходящих палет при том же среднем заполнении:

$$100\ 000 / 27 / 20 = 185,2 \text{ палеты/ч}$$

Эти две формулы задают баланс. Если имитация показывает существенно другой устойчивый результат без объяснимого остатка или потерь, в модели есть ошибка.

Для выбранного сценария модель дополнительно проверяет сохранение товаров непосредственно на границах 24-часового рабочего окна:

```
69 660 в системе на начало
+ 2 384 100 поступило
= 2 386 800 отгружено
+ 66 960 осталось в системе
```

Расхождение равно **0 товаров**. Конечный остаток не объявляется потерей: это товары в очередях, обработке, накопителях направлений, палетах и буфере отгрузки. Нулевое расхождение подтверждает, что показатель сквозного выхода получен из сохранённого физического потока, а не подставлен из входного параметра.

4.2. Ворота отгрузки

Через одни ворота за два часа проходит 16 палет с КТЯ. Для 24 ворот:

```
24 ворот × 16 палет / 2 часа = 192,0 палеты/ч
```

Аналитическая загрузка ворот составляет 96,5%. Запас есть, но он невелик. Поэтому ворота нельзя считать второстепенной декорацией: сбой расписания или уменьшение их числа быстро переносит ограничение в отгрузку.

4.3. Сколько нужно сортировочных линий

Линий	Мощность, товаров/ч	Загрузка в норме	После отказа одной	Роль
10	100 000	100,0%	111,1%	Только номинал
11	110 000	90,9%	100,0%	Минимальный резерв мощности
12	120 000	83,3%	90,9%	Рабочая рекомендация
13	130 000	76,9%	83,3%	Строгий N+1 при цели 85%

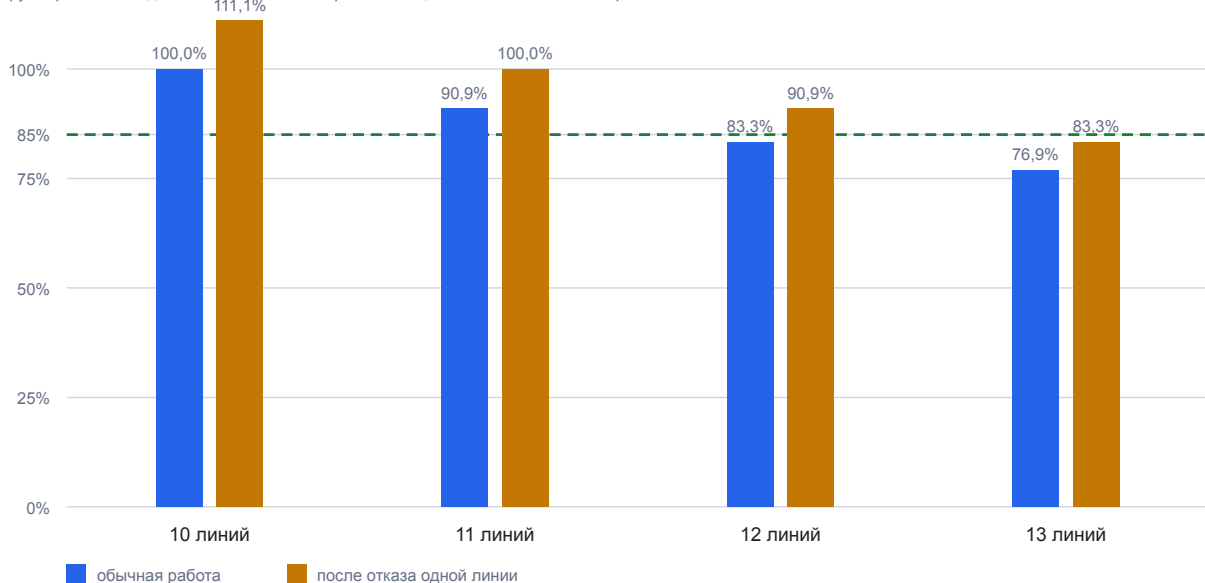
Десять линий работают при расчетной загрузке 100%. Такая конфигурация может служить контрольной нижней границей, но не рабочей рекомендацией. Одиннадцать линий дают запас по суммарной мощности, однако обычная загрузка 90,9% выше принятой инженерной цели 85%.

Двенадцать линий дают 120 000 товаров/ч паспортной мощности и загрузку 83,3%. После отказа одной линии остается 110 000 товаров/ч, но загрузка оставшихся поднимается до 90,9%. Это позволяет пережить ограниченную остановку, хотя не соответствует строгому N+1 при целевой загрузке 85%.

Тринадцать линий нужны, если требование 85% должно выполняться и после отказа одной линии. В рамках хакатона мы выбираем 12 как разумный компромисс между резервом и площадью, а 13 показываем как более консервативный вариант.

Число линий и эксплуатационный резерв

Загрузка рассчитана для потока 100 000 товаров/ч и мощности линии 10 000 товаров/ч.



5. Как устроена имитационная модель

5.1. Что означает DES

DES расшифровывается как discrete-event simulation, по-русски «дискретно-событийное моделирование». Модель не пересчитывает весь центр каждую миллисекунду. Время переходит от одного значимого события к следующему: поступила палета, освободилась станция, завершилась сортировка, заполнился КТЯ, сформировалась палета, подошло время рейса.

Такой подход подходит для сортировочного центра, потому что результат зависит не только от средней мощности. Важен порядок событий. Две операции могут иметь достаточную среднюю производительность, но совместно создавать очередь, если они конкурируют за один ресурс или работают с разным ритмом.

5.2. Уровень детализации

Модель создает события для КТЯ, палет и операций над ними. Каждый отдельный товар не становится отдельным объектом Python: это сделало бы прогон тяжелее, но не добавило бы точности при отсутствии индивидуальных данных о товарах. Распределение товаров по направлениям учитывается пакетно внутри КТЯ.

400 направлений имеют неравномерный спрос. В базовом сценарии 20% направлений получают 80% потока. Это создает горячие и холодные направления и позволяет проверить заполнение выходных КТЯ.

5.3. Что измеряется

Для каждого участка модель записывает:

- поступления и завершения операций;
- загрузку ресурса;
- очередь и незавершенную работу;
- среднее время ожидания и обслуживания;
- результаты по интервалам 1 минута, 1 час, 12 часов и 24 часа.

Отдельно считаются сортировка, сквозной выход и годный сквозной выход. Это три разных показателя:

- сортировка отвечает, сколько товаров прошли сортировочные линии;
- сквозной выход отвечает, сколько товаров покинули центр через отгрузку в рабочем окне;
- годный выход дополнительно исключает ошибочно направленные и поврежденные товары в сценарии качества.

5.4. Прогрев и рабочее окно

Система стартует пустой. Если измерять первые часы, выход будет занижен: товар еще физически не успел пройти все участки. Поэтому перед 24-часовым измерением используются четыре часа прогрева. События прогрева создают нормальное состояние очередей и буферов, но не входят в итоговые показатели.

После рабочего окна модель может завершить уже начатую работу для расчета остатка. Этот «хвост» не прибавляется к сквозному выходу рабочего окна.

5.5. Проверки корректности

Модель проверяется на трех уровнях:

1. аналитический баланс товаров, КТЯ и палет;
2. автоматические тесты событий, очередей, отгрузки, площади и отказов;
3. повторяемый прогон с фиксированным генератором случайных чисел.

Отдельные категории случайности используют независимые потоки. Благодаря этому при сравнении двух топологий случайное изменение времени обслуживания не подменяет эффект самой топологии.

6. Рабочий сценарий

6.1. Условия опыта

Параметр	Значение
Рабочее окно	24 часа
Прогрев	4 часа
Вход	100 000 товаров/ч
Линии	12 по 10 000 товаров/ч
Направления	400, распределение 80/20
Политика	Балансировка нагрузки
Выходной накопитель	Общий по направлению
Начальное число случайного генератора (seed)	42
Коэффициент вариации времени	0,25

Seed - это начальное число генератора случайных значений. Одинаковый seed и одинаковые параметры дают повторяемый опыт. Он не делает процесс детерминированным, а позволяет другому проверяющему получить тот же результат.

6.2. Итоговые показатели

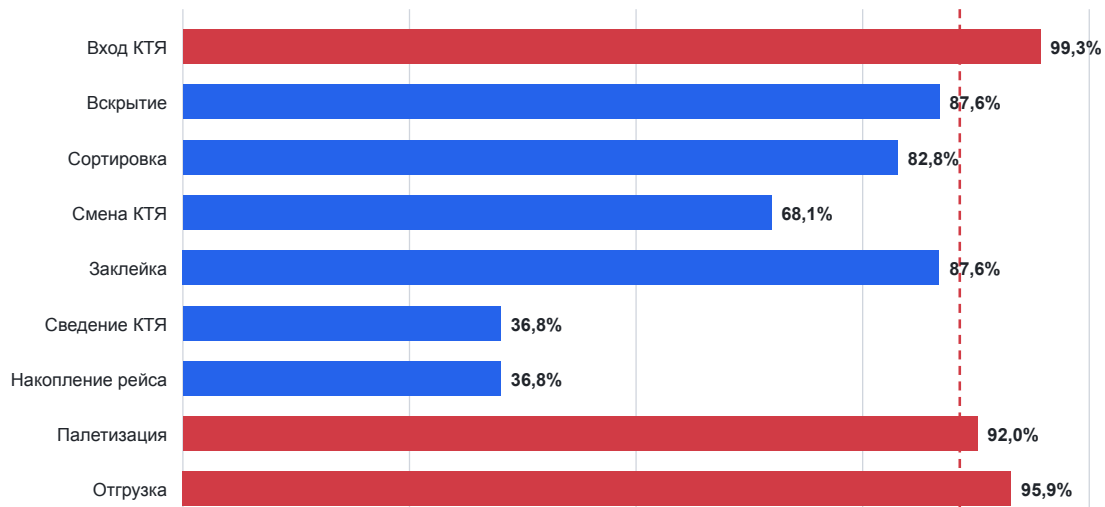
Показатель	Результат	Как читать
Вход	100 000 товаров/ч	Заданный спрос, не достижение модели
Сортировка	99 350 товаров/ч	Фактический выход линий в окне
Сквозной выход	99 450 товаров/ч	Фактическая отгрузка в окне
Палеты	184,2 палеты/ч	Исходящий поток палет
Среднее время КТЯ	40,3 мин	От входа до отгрузки
P95 времени	60,5 мин	95% КТЯ проходят не дольше
Выполнение SLA 24 ч	100,0%	Доля отгруженных в срок
Незавершенная работа в конце	3 962 КТЯ	Нормальный оборотный запас процесса
Возраст старейшего остатка	1,4 ч	Проверка зависшего потока

Сквозной выход немного отличается от сортировки. Это нормально: в начале окна в центре уже есть работа после прогрева, а в конце остается новый запас. Поэтому единичное значение может быть чуть выше или ниже входа. Смысл имеет его устойчивость на длинном окне и отсутствие стареющей очереди.

6.3. Где остается мало запаса

Загрузка ключевых участков

Красная линия показывает 90%: выше нее небольшой сбой быстро превращается в очередь.



Самые напряженные участки - входная граница, накопление по рейсам, отгрузка и палетизация. Загрузка отгрузки составляет 95,9%, палетизации - 92,0%.

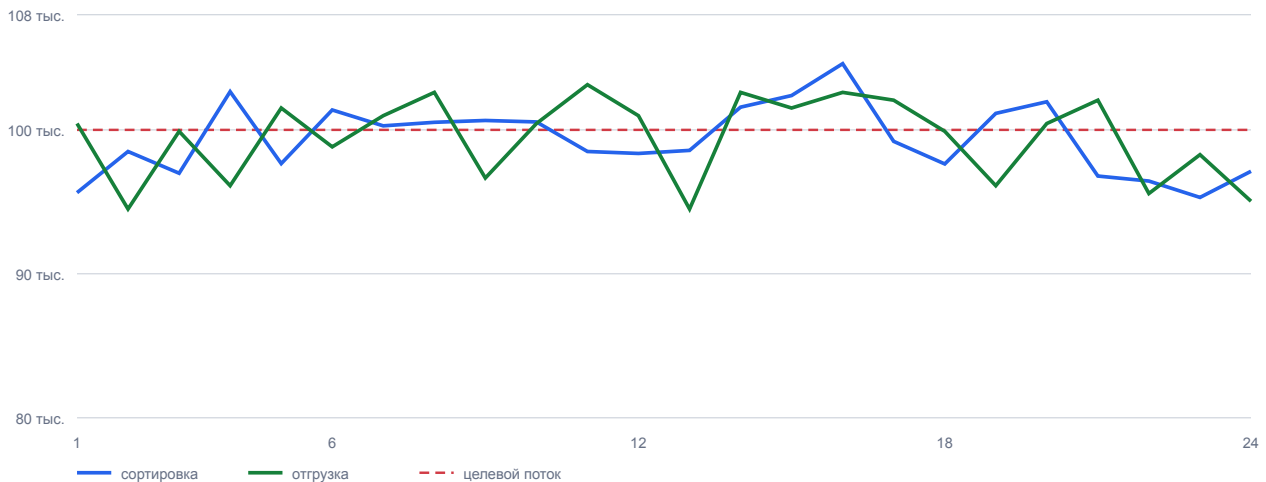
Сортировочные линии в среднем загружены на 82,8%.

Это не означает, что сортировка не важна. Именно запас двенадцати линий не дает ей стать первым ограничением. Если оставить десять линий или отключить балансировку, ограничение возвращается в сортировочный контур.

6.4. Почему среднее нужно дополнять графиком

Поток в течение 24-часового окна

Колебания по часам объясняют, почему одна средняя цифра недостаточна для оценки системы.



Среднее за сутки сглаживает колебания. Почасовой график показывает, что сортировка и отгрузка не обязаны совпадать в каждом отдельном часу. Буферы переносят работу между интервалами, но за сутки потоки должны сходиться.

6.5. Загрузка отдельных линий

Загрузка каждой линии сортировки

Балансировка распределяет поток почти равномерно; небольшие различия вызваны случайностью поступления.



Модель не представляет 12 сортировщиков одним условным блоком. Каждая линия является отдельным ресурсом и имеет собственную загрузку. В рабочем сценарии разброс мал, потому что политика специально выравнивает очередь. Ровная загрузка здесь является результатом правила управления, а не заранее заданной константой.

7. Сценарии, которые меняют решение

Сценарий	Сортировка, товаров/ч	Сквозной выход, товаров/ч	Годный выход, товаров/ч	Среднее время, мин	Площадь, м²
12 линий, общий накопитель	99 350	99 450	99 450	40,3	23 445
12 линий, локальные ячейки	99 356	65 562	65 562	365,2	31 858
Стресс качества	99 361	99 428	98 733	40,2	23 443
Отказ одной линии на 2 ч	99 357	99 428	99 428	40,2	23 456

Таблица нужна не для выбора самой большой цифры. Каждый сценарий отвечает на отдельный инженерный вопрос.

7.1. Где объединяются товары одного направления

В исходных данных не сказано, как физически организованы выходы нескольких параллельных сортировщиков. Мы проверили два крайних варианта:

- общий накопитель: товары одного направления от всех линий объединяются до формирования выходного КТЯ;
- локальные ячейки: каждая линия отдельно держит КТЯ для каждого направления.

Цена физической топологии выходных КТЯ

Для каждого показателя шкала нормирована отдельно; точные значения подписаны над столбцами.



При общем накоплении нужно 400 потенциальных ячеек, среднее заполнение составляет 27,0 товара. При локальных ячейках нужно 4 800 позиций, среднее заполнение падает до 17,1 товара, а 49,4% КТЯ закрываются неполными. Сквозной выход снижается до 65 562 товаров/ч.

Причина понятна без математики: поток холодного направления делится между 12 КТЯ и каждый из них заполняется медленно. Следовательно, рабочая концепция требует физического механизма сведения товаров одного направления или многостадийной консолидации после линий. Общий накопитель в модели не является «бесплатным» допущением, а формулирует требование к будущей конструкции.

7.2. Смена выходного КТЯ

Снятие полного и установка пустого КТЯ моделируются ограниченным ресурсом. При времени 8 секунд его загрузка составляет 68,1%. Значит, в рабочем сценарии механизм имеет запас. Если паспортное время будет выше, этот узел нужно пересчитать.

7.3. Ошибки и повреждения

В основном сценарии качество принято нейтральным, потому что организатор не дал статистику ошибочной маршрутизации и повреждений. Чтобы оценить цену этой неопределенности, создан стресс-сценарий: точность сортировки 99,5%, доля повреждений 0,2%, первичное считывание 95%.

Результат стресс-сценария:

- годный сквозной выход 98 733 товаров/ч;
- выход годной продукции 99,3%;
- ошибочное направление около 496 товаров/ч;
- повреждение около 199 товаров/ч.

Этот опыт не предсказывает реальное качество оборудования. Он показывает, какие показатели нужно запросить у поставщика и почему их нельзя смешивать с обычной пропускной способностью.

7.4. Отказ одной линии

В отдельном опыте одна из 12 линий недоступна два часа. Средняя сортировка за рабочее окно составляет 99 357 товаров/ч, сквозной выход - 99 428 товаров/ч. Краткая остановка не разрушает суточный SLA, потому что оставшиеся 11 линий имеют 110 000 товаров/ч номинальной мощности.

Этот вывод нельзя распространять на длительный отказ или две одновременные остановки. Для такого требования нужно либо 13 линий, либо формально заданное время восстановления и отдельный расчет доступности.

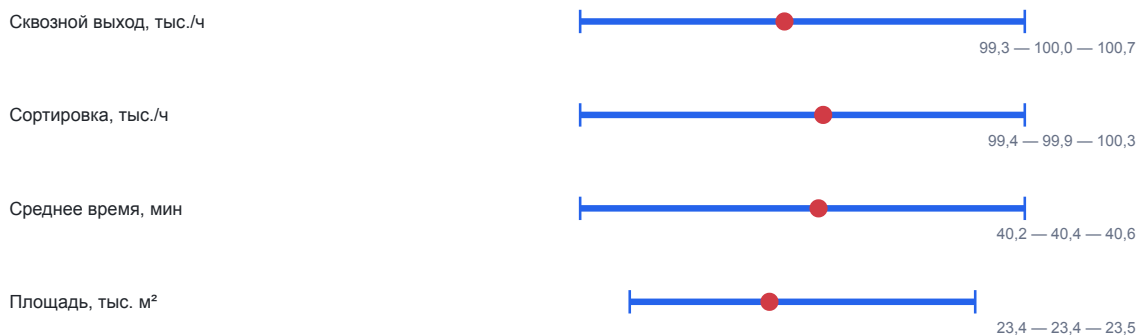
8. Случайность и Монте-Карло

8.1. Зачем повторять один сценарий

Один прогон с seed 42 нужен для воспроизводимости, но не описывает весь возможный разброс. Метод Монте-Карло повторяет тот же опыт с разными seed и собирает распределение результата. В отчет вошли 20 прогонов по 24 часа с одинаковыми параметрами и коэффициентом вариации 0,25.

Разброс результатов в 20 случайных прогонах

Точка — среднее; линия — эмпирический интервал от 2,5-го до 97,5-го перцентиля.



Средний сквозной выход равен 99 986 товаров/ч. Эмпирический интервал от 2,5-го до 97,5-го перцентиля составляет 99 348-100 735 товаров/ч. Для площади среднее равно 23 444 м², интервал - 23 428-23 466 м².

Это не «гарантия 95%» в статистическом смысле для реального центра. Модель еще не откалибрована по фактическим временам операций. Интервал показывает устойчивость вывода к той случайности, которую мы явно заложили. После получения данных распределения нужно заменить и повторить опыт.

9. Площадь и компоновка

9.1. Как считается площадь

Для каждой зоны используется формула:

$$\begin{aligned} \text{площадь зоны} &= \text{базовая площадь} \\ &+ \text{число единиц оборудования} \times \text{площадь единицы} \\ &+ \text{пиковая очередь} \times \text{площадь единицы буфера} \end{aligned}$$

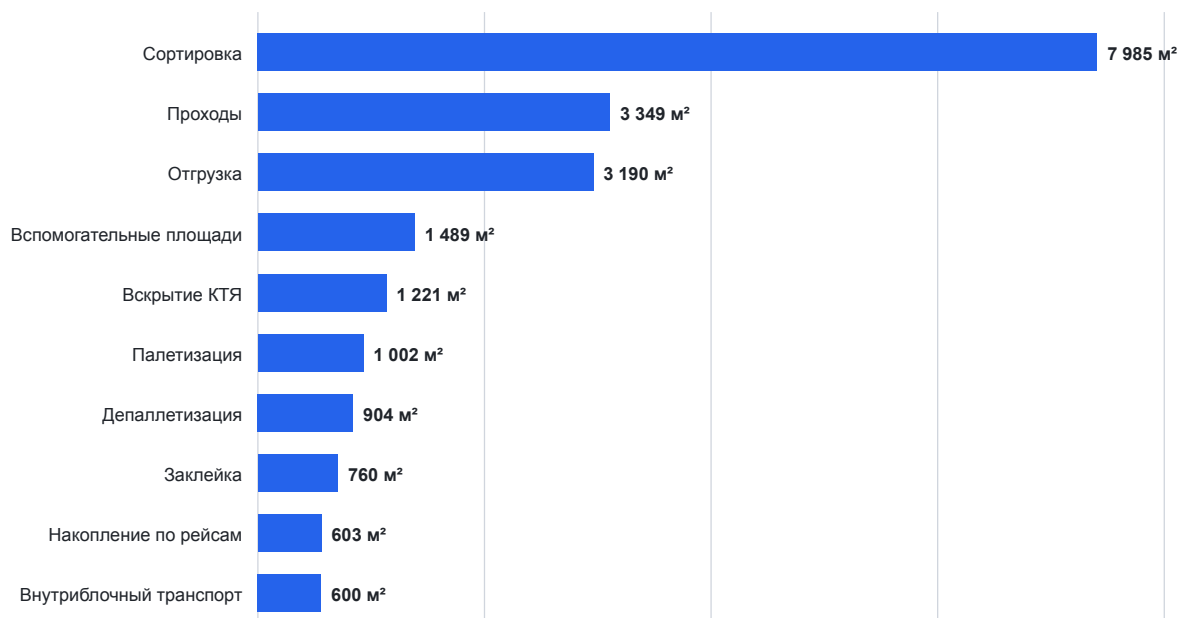
После суммирования операций добавляются 18% на проходы и 8% на вспомогательные площади. Пиковая очередь берется из DES, поэтому площадь буфера зависит от поведения потока, а не только от ручного норматива.

9.2. Результат

Зона	Базовая, м²	Оборудование, м²	Буфер, м²	Всего, м²
Вход КТЯ	450	0	1	451
Депаллетизация	900	0	4	904
Вскрытие КТЯ	1 200	0	21	1 221
Повторное считывание	180	0	1	181
Ручной разбор	220	0	1	221
Сортировка	2 100	5 880	5	7 985
Заклейка	750	0	10	760
Повторное использование КТЯ	520	0	9	529
Картонные отходы	180	0	14	194
Новые КТЯ	180	0	3	183
Сведение КТЯ по рейсам	160	0	2	162
Накопление по рейсам	420	0	183	603
Палетизация	980	0	22	1 002
Буфер отгрузки	420	0	2	422
Отгрузка	960	2 208	22	3 190
Внутриблочный транспорт	600	0	0	600
Проходы				3 349
Вспомогательные площади				1 489

Крупнейшие составляющие площади

Площадь сортировки доминирует, поэтому уточнение габаритов линии сильнее всего влияет на итог.



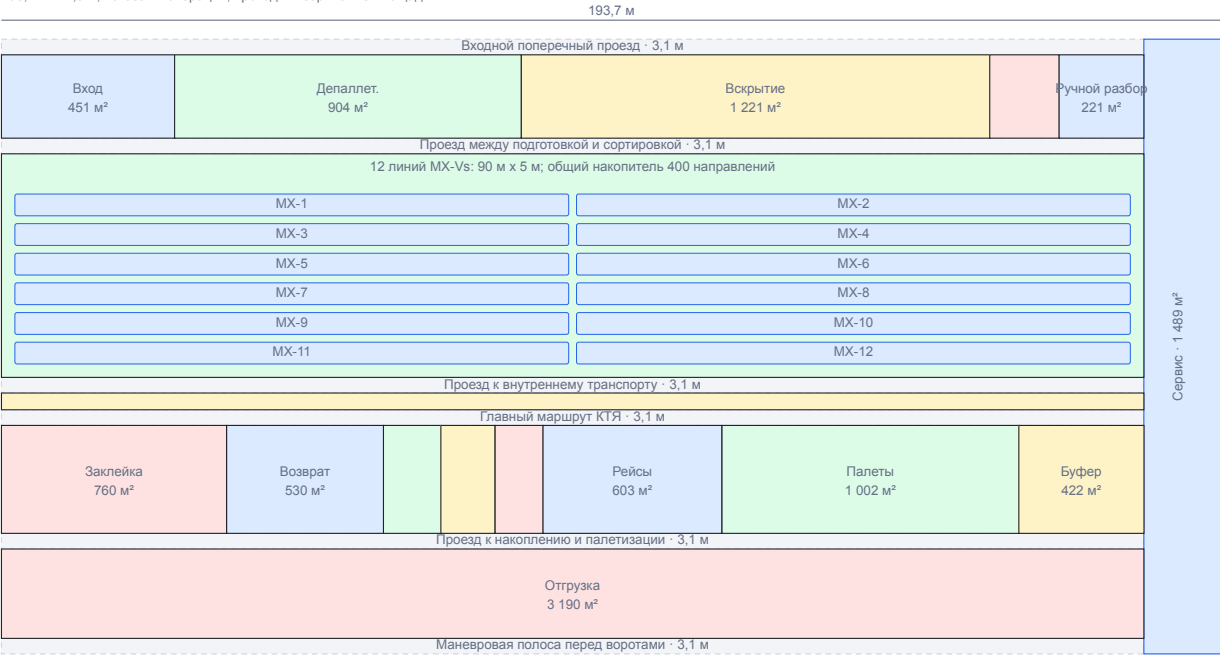
Итог 23 445 м² находится внутри типового ориентира. Основной вклад дает зона сортировки: 5 400 м² занимают 12 линий MX-Vs в выбранном 90-метровом габарите при шаге 5 м, 480 м² — общий накопитель 400 направлений, 2 100 м² — индукция, объединяющие конвейеры, торцевые станции и сервис.

Паспорт MX-Vs подтверждает максимальную длину 90 м и производительность, но не подтверждает проектный шаг 5 м и не является чертежом Ozon. Поэтому эти части честно остаются инженерными допущениями команды, а не «паспортной площадью сортировщика».

9.3. Инженерная план-схема

Инженерная план-схема сортировочного центра

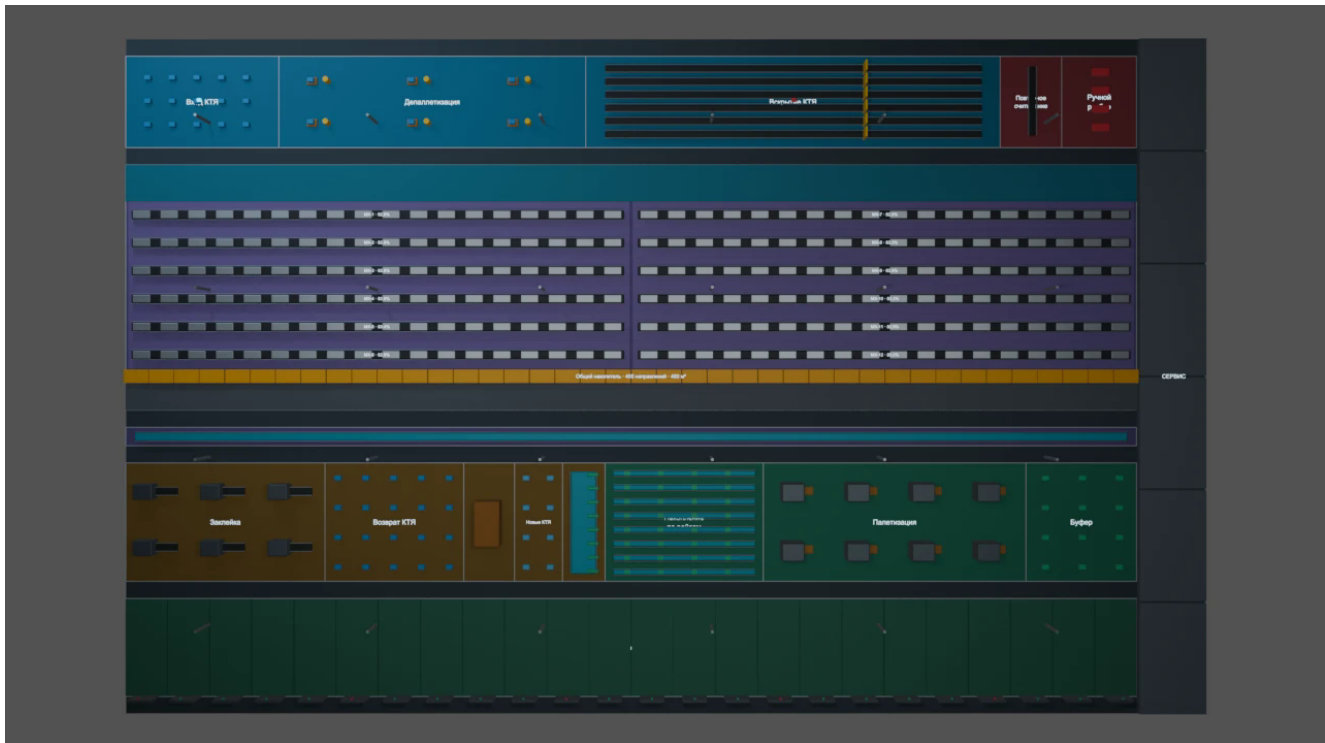
193,7 × 121,0 м; показаны операции, проходы и сервисные площади.



Контур здания рассчитан по всей площади, а не только по операционным зонам. На плане отдельно показаны 12 линий MX-Vs в двух банках, общий накопитель 400 направлений, шесть проездов, главный маршрут КТЯ, маневровая полоса перед 24 воротами и сервисные помещения. Площади прямоугольников и габариты общего контура заданы в метрах и согласованы с расчётом площади.

Это концептуальная инженерная компоновка, а не рабочий строительный чертёж. Она проверяет, помещаются ли операции, накопители и транспортные коридоры в ориентир площади, но не заменяет проектирование колонн, эвакуационных путей, ограждений оборудования и точных радиусов движения техники.

9.4. 3D-план штатной конфигурации



Трёхмерный макет строится из тех же координат, что рисунок 9.3, а не рисуется отдельно: перенесены все 16 зон, 6 поперечных проездов, сервисная полоса и 24 ворот. Внутри зоны сортировки показаны две группы по шесть линий, общий накопитель направлений и торцевые станции. Анимированные товары показывают маршрут, но не заменяют расчёт: очереди, загрузка и сквозной выход определяются DES-моделью.

В сцене сохранена та же граница доказательства, что и в расчёте площади: паспортная длина MX-Vs составляет до 90 м, а шаг 5 м, форма накопителя и взаимное расположение узлов являются допущениями команды. Поэтому это концептуальный инженерный макет, а не CAD-модель производителя и не монтажный проект реального центра Ozon.

9.5. Что проверить перед рабочим проектом

Попадание в ориентир площади не означает, что её можно бездумно уменьшать. Перед следующим этапом нужны: паспортная ширина линии и сервисные зазоры, проект объединяющих конвейеров к общему накопителю, пропускная способность точек слияния и безопасные проходы. Сокращение числа линий до 11 уменьшит площадь, но поднимет обычную загрузку до 90,9% и ухудшит устойчивость.

10. Что рекомендует модель

10.1. Рабочая конфигурация

Для дальнейшего проектирования рекомендуются:

- 12 параллельных линий Interroll MX-Vs с паспортной мощностью до 10 000 товаров/ч каждая, в двух банках по выбранной 90-метровой компоновке;
- динамическая балансировка входного потока между линиями;
- общий контур консолидации товаров одного направления после параллельной сортировки;
- автоматическая смена выходного КТЯ;
- отдельные контуры повторного считывания и ручных исключений;
- отдельный MultiBelt Switch для сведения запаянных КТЯ в 8 групп рейсов и накопление КТЯ по рейсам перед палетизацией;
- 24 ворот с контролем расписания и загрузки;
- измерение сортировки, сквозного выхода и качества как разных показателей.

10.2. Что именно доказано

При заданных параметрах модель показывает, что конфигурация способна поддерживать поток, близкий к 100 000 товаров/ч, и выполнять срок 24 часа. Она также показывает, что:

- десять линий не дают эксплуатационного резерва;
- выходная топология влияет на результат сильнее, чем небольшое изменение паспортной мощности;
- отгрузка работает близко к пределу и должна оставаться частью сквозной модели;
- площадь является активным ограничением, а не формальной строкой отчета.

10.3. Что пока не доказано

Модель не подтверждает, что Ozon использует именно выбранные референсы, не даёт коммерческую стоимость, среднюю наработку до отказа (MTBF), время восстановления или промышленную точность. Не доказана и готовая монтажная реализация общего накопителя на 400 направлений. Для этих выводов нужны коммерческое предложение поставщика, выбранная конструктивная схема и, при доступности, калибровка по наблюдениям.

Это не делает текущую работу бесполезной. Напротив, модель сузила неопределенность: теперь понятно, какие параметры определяют решение и какие данные нужно получить следующими.

10.4. Следующие проверки

1. Подтвердить у поставщика ширину MX-Vs, сервисные зоны и требования к объединяющим конвейерам.
2. Зафиксировать физическую схему общего накопления 400 направлений после 12 линий.
3. Получить время смены КТЯ, точность сортировки, среднюю наработку до отказа и время восстановления.
4. Заменить синтетическое расписание рейсов реальным.
5. Проверить длительный отказ, две одновременные остановки и восстановление накопившейся очереди.
6. Выполнить отдельную проверку безопасности и обслуживаемости компоновки.

10.5. Экономическая рамка

Открытые материалы подтверждают технические пределы выбранного оборудования, но не содержат цены готовой линии для этой компоновки. Поэтому отчёт не подменяет коммерческое предложение выдуманной суммой. На следующем этапе варианты нужно сравнивать по совокупной стоимости владения:

CAPEX = оборудование + конвейеры + накопители + монтаж + интеграция + резерв
 OPEX = персонал + энергия + обслуживание + запасные части + потери простоев
 TCO = CAPEX + OPEX за выбранный срок

DES уже даёт входы для такой оценки: число линий и механизмов, персонал смены, занимаемую площадь, загрузку ресурсов, объём незавершённой работы и последствия отказа. Для денежного расчёта остаётся получить сопоставимые предложения поставщиков, тарифы и стоимость площади. Так экономический вывод будет проверяемым, а не декоративным.

11. Воспроизводимость

11.1. Что нужно для повторения

- Python 3.11 или новее;

- зависимости проекта из `pyproject.toml`;
- сценарий `scenarios/production-12-lines.json`;
- политика `balanced-load`;
- начальное число случайного генератора (seed) 42;
- 4 часа прогрева и 24 часа измерения.

11.2. Команды

```
python3 -m venv .venv
.venv/bin/python -m pip install -e '.[dev]'
.venv/bin/python -m pytest
.venv/bin/python scripts/generate-submission-report.py
```

Генератор повторно создает:

- JSON каждого сценария в `submission/report/data/`;
- CSV с таблицами в `submission/report/tables/`;
- SVG-графики в `submission/report/figures/`;
- этот Markdown-файл.

Краткий контракт контрольных показателей записывается в `data/canonical-kpis.json`. Команда `scripts/verify-submission-report.py` проверяет, что README, evidence, отчёт и исходный JSON используют одинаковые цифры и единицы.

Дашборд запускается командой:

```
docker compose up --build
```

После запуска интерфейс доступен по адресу `http://127.0.0.1:8000`.

12. Трассировка требований

Требование организатора	Где отражено в модели	Где показано в отчете
100 000 товаров/ч	Вход сценария и DES	Разделы 1, 4 и 6
400 направлений	Маршрутизация и выходные ячейки	Разделы 3 и 7
Габариты и масса sort-потока	Ограничения входного контура: КТЯ до 600×400×400 мм и 30 кг; товар до 320 мм и 10 кг	Раздел 2
Связный процесс	События от входа КТЯ до ворот	Разделы 2, 3 и 5
КТЯ, возврат и брак	Контуры тары	Разделы 2 и 3
Исключения	Повторное считывание и ручной разбор	Раздел 3
Палетизация и 24 ворот	Ресурсы исходящего контура	Разделы 4 и 6
Метрики по времени	Интервалы 1 мин, 1 ч, 12 ч, 24 ч	Разделы 5 и 6
Изменение параметров	JSON-сценарии и дашборд	Разделы 7, 8 и 11
Узкие места	Загрузка, очереди, сценарии	Разделы 6 и 7
Площадь и компоновка	Расчет зон из DES	Раздел 9
Отказы	Сценарий остановки линии	Раздел 7
Воспроизводимость	Код, тесты, данные, генератор	Раздел 11

Заключение

Поставленная задача состоит не в том, чтобы нарисовать сортировочный центр и приписать ему 100 000 товаров в час. Нужно показать, как этот поток проходит через связанные операции и где проект перестает работать.

Наша модель дает такой ответ. Двенадцать линий с балансировкой и общим накоплением направлений обеспечивают требуемый порядок сквозной производительности и срок до 24 часов. Десять линий оставляют систему без

резерва, локальные ячейки разрушают заполнение КТЯ холодных направлений, а отгрузка остается близкой к пределу.

Окончательное решение сейчас ограничивает не вычислительная модель, а точность исходных данных для рабочего проектирования. Концептуальная план-схема с операциями, проходами и сервисными площадями укладывается в ориентир, но монтажные габариты и узлы консолидации должны быть подтверждены поставщиком. Именно для такого последовательного уточнения решения и построена модель.

Приложение А. Файлы исходных результатов

- `data/candidate.json` - рабочий сценарий;
- `data/canonical-kpis.json` - единый контракт контрольных показателей;
- `data/local_cells.json` - локальные выходные ячейки;
- `data/quality_stress.json` - стресс качества;
- `data/one_line_failure.json` - отказ одной линии;
- `data/monte-carlo.json` - 20 случайных прогонов;
- `data/policy-comparison.json` - сравнение управляющих правил;
- `data/labor.json` - расчет численности смены;
- `tables/scenario-comparison.csv` - сводное сравнение;
- `tables/policy-comparison.csv` - показатели политик;
- `tables/labor.csv` - расчет по ролям;
- `tables/area-breakdown.csv` - расчет площади;
- `tables/sorter-utilization.csv` - загрузка отдельных линий;
- `tables/hourly-throughput.csv` - почасовой поток.

Приложение Б. Ограничения интерпретации

1. Результаты относятся к модели и принятым параметрам, а не к уже выбранному промышленному оборудованию.
2. Эмпирические интервалы Монте-Карло отражают заданную случайность, но не заменяют калибровку на реальных данных.
3. Площадь является инженерной оценкой по полу. Строительные ограничения, колонны и безопасность не проектировались.
4. Nonsort показан на границе модели и не прибавляется к 100 000 сортируемых товаров/ч.
5. Общая консолидация направлений является функциональным требованием к конструкции, а не доказанной схемой оборудования.