

Облачная параметрическая CAD-система RECADA / Airholder — полное описание проекта (v42)

Идея · архитектура · файлы и форматы · рабочий процесс проектирования · конфигуратор (Unity) · прототипирование · испытания ISO 11154 · аксессуары · наём в разных странах и кадры · жизненный цикл · ISO 9001 · защита и VDI · инфраструктура и выбор серверов · инструмент реверса (recada.py) · редактор изделия · автоматизация · финансы · управление · риски · дорожная карта — ревизия 42 · 4 сентября 2026

Легенда: термины и сокращения

Короткий словарь для чтения документа. Каждый термин объяснён одной строкой — подробности в соответствующих разделах.

Термин	Что это простыми словами
JSON	Текстовый формат данных «поле: значение» — язык параметров системы (params.json, паспорта); правится блокнотом
YAML	«JSON для людей» — тот же смысл, но читается как список с отступами; у нас — язык инструкций по монтажу
spec.yaml / SDD	Спека задачи до геометрии: зачем деталь, с чем стыкуется, проверяемые условия приёмки, чего не делаем; CI строит из неё приёмочный прогон; основа сдельной оплаты (Spec-Driven Development)
Python / build123d	Язык программирования / библиотека, на которой написаны генераторы — код, строящий геометрию из параметров
Генератор (generator.py)	Скрипт, читающий params.json и паспорт и строящий деталь; читается как техпроцесс
Паспорт (vehicle/accessory passport)	JSON с точками крепления, углами и поверхностями машины или аксессуара — всё, что нужно знать о чужом объекте
Скелет / MasterParams	Каркас из точек и осей с главными параметрами (высота, углы) — мост между машиной и изделием
Git	Система контроля версий: полная история «кто, что, когда и зачем изменил»; основа всей работы
Gitea	Наш собственный веб-сервер для Git (аналог GitHub, но на нашем железе): репозитории, права, ревью, канбан
Репозиторий (repo)	Папка проекта под управлением Git со всей историей
Коммит (commit)	Одно сохранённое изменение с обязательной причиной («зачем») в сообщении
Дифф (diff)	Наглядная разница между двумя версиями файла: что добавлено, что убрано, строка за строкой; «читаемый дифф» = изменение видно глазами (height: 60 → 80), поэтому истина хранится текстом
Ветка (branch)	Параллельная линия работы для экспериментов; main — главная, защищённая
PR (Pull Request)	Запрос «принять мои изменения в main» — точка ревью и подписи; в main нельзя писать напрямую
Тег (git-tag) / Релиз	Именованная метка версии; релиз детали = подписанный тег, только из него идёт производство
LFS (Large File Storage)	Расширение Git для тяжёлых файлов: в истории — лёгкий указатель, тело — в хранилище рядом; для сканов, STEP, отчётов
zippey	Фильтр, позволяющий Git читать содержимое .FCStd (FreeCAD) и показывать осмысленные диффы

Термин	Что это простыми словами
CI (Continuous Integration)	Серверный конвейер: по коммиту/тегу сам собирает геометрию, гоняет проверки и выкладывает артефакты
Артефакт	Файл, построенный CI из истины (STEP, GLB, PDF, BOM): не редактируется — пересобирается
Валидатор / DFM	Автопроверка «производимо ли»: правила гибки Blechcon, зазоры, упаковка, крепёж; красный = стоп
B-Rep / STEP-топология	Способ хранения точной геометрии: тело → оболочки → грани → рёбра → вершины; из него и извлекаются размеры при обмере
AAG (граф смежности граней)	Граф «грань → соседняя грань»: отсечение торцевых граней расщепляет деталь на верхнюю и нижнюю оболочки — основа автоматического распознавания гибов
Скелет детали / Medial Axis	Срединное представление без толщины: пластины + линиигиба + толщина одним параметром; результат обмера и основа параметризации
FTG (граф переходов гибки)	Свёртка AAG: гиб = ребро графа, фланцы = узлы; объединяет соосные гибы, разорванные разгрузками, в один технологический переход
BA / BD (припуск и вычет)	Формулы длины развёртки через K-фактор и нейтральную ось (ANSI/DIN) — считаются аналитически, без CAD
Kerf (ширина реза)	Металл, съедаемый лазером/плазмой; закладывается в раскрой, иначе деталь выходит меньше номинала
Разгрузка (Entlastungsschnitt / relief)	Вырез у краягиба, чтобы металл не рвался при гибке; в системе вычисляется правилом по t/R, а не копируется из оригинала
Пружинение (springback)	Металл после гибки частично распрямляется; у нержавеющей стали заметно — угол на прессе задают с запасом
FEM / CalculiX / Gmsh	Расчёт прочности и собственных частот (модальный); Gmsh строит сетку, CalculiX считает — бесплатные
CFD / OpenFOAM	Расчёт обтекания воздухом (аэродинамика); тяжёлый, применяется разово вне конвейера
STEP / DXF	Обменные форматы точной геометрии: STEP — 3D для Blechcon и от OEM, DXF — плоские развёртки и сечения
STL / GLB	Сетки из треугольников без точных размеров: STL — печать прототипов, GLB — показ в конфигураторе
.FCStd	Файл FreeCAD; у нас двойной статус: скелеты руками = истина, просмотрные сборки от CI = артефакт
BOM (Bill of Materials)	Спецификация: из чего состоит изделие, массы, цены — генерируется CI
catalog.json	Контракт между CI и конфигуратором: список деталей со статусами, ссылками на GLB и правилами
SKU / Rev (ревизия)	Артикул детали / версия конструкции внутри артикула (Rev A, B...)
FFF (Form-Fit-Function)	Правило: посадка и функция не изменились → новая ревизия того же SKU; изменились → новый SKU
VDI / Kasm	FreeCAD в браузере: программа работает на нашем сервере, человеку летят только пиксели; файлы не покидают сервер
Контейнер / Docker	Изолированная «коробка» с одним приложением; VDI-сессия = одноразовый контейнер
WireGuard / VPN	Шифрованный туннель в нашу сеть; ключ = допуск, отзыв ключа = мгновенное отключение человека
2FA / TOTP	Второй фактор входа: код из приложения на телефоне
Webhook	Автоматический сигнал одной системы другой («остаток = 0») — триггер для скриптов CI

Термин	Что это простыми словами
LLM / Claude / MCP	Языковая модель как помощник; MCP — протокол, через который Claude управляет FreeCAD и инструментами
Промпт	Задание модели обычным языком («поднять платформу на 40 мм»); меняет параметры, не геометрию напрямую
GDPR / GeschGehG / StVZO / ISO 11154	Регуляторика: защита данных ЕС / закон ФРГ о коммерческой тайне / правила допуска TC / стандарт испытаний багажников
CM1 / CM2	Маржа изделия / маржа с учётом стоимости разработки — уровни финансовой модели
CPQ	Configure-Price-Quote: инструмент дилера «собрал конфигурацию → цена → КП → заказ в производство»
OCCT / OpenCASCADE	открытое геометрическое ядро (B-Rep, булевы, скругления, STEP); то же ядро внутри FreeCAD; у нас вызывается напрямую
ОСР	Python-обёртка OCCT из пакета cadquery-оср; на ней написан recada.py; версия ядра 7.9.3
recada.py	единый файл инструмента реверса: обмер, оболочки, кинематика, растяжение, операции, приёмка; CLI и браузерный интерфейс
headless	работа без графического экрана — на сервере, в CI, пакетно
Streamlit	библиотека браузерного интерфейса на Python; рабочее окно инструмента
three.js	библиотека 3D-графики в браузере; наш просмотрщик сборок
HLR (Hidden Line Removal)	модуль OCCT: проекции тела с видимыми и скрытыми линиями — штриховые виды для чертежей и инструкций, вектор
XCAF	слой OCCT для структуры сборки: имена деталей, дерево, положения, цвета в STEP
BREP (формат)	внутренний формат ядра; версия меняется с релизом; внутри процесса — да, на границах — только STEP
Три критерия приёмки	метрология (точность), целостность (свободные рёбра = 0, солид ≥ 1), распознавание порталом поставщика; далее: посадка по скану, входной контроль, полевой
Метрология (point-sampling)	расстояние от точек эталона до поверхности кандидата, двусторонняя выборка, порог 99.9 % в 0.05 мм
Свободное ребро	ребро с одной гранью — дыра в оболочке; их ноль = деталь замкнута
Виртуальный щуп	точка – нормаль $\times t$ попадает на поверхность → грань оболочечная; метод расщепления листа на две стороны
Оригами-кинематика	жёсткие пластины на шарнирах по осям гибов; поворот угла — поворот поддерева
К-фактор	положение нейтрального слоя в гibe (0.33–0.5); задаёт припуск BA; калибруется по ответам портала
Портал Blechcon	веб-портал поставщика резки и гибки: принимает STEP, считает развёртку; третий критерий приёмки
product.json / project.json	истина изделия и проекта: параметры и журнал операций; геометрия — артефакт из них
Aufbaurichtlinien	руководства производителей для строителей надстроек (VW, Ford BEMM, Stellantis): нагрузки, зоны, запреты, крепёж — первый источник ограничений
OEM-CAD / JT / CATIA	заводская геометрия кузова; форматы JT и CATIA конвертируются в STEP один раз (Inventor открывает JT)
FBX	формат визуальных моделей (Blender, Unity); машина как сетка с условным масштабом
ICP / Open3D / trimesh	регистрация скана в систему координат (ICP), библиотеки работы с сетками
WebRTC / стриминг вьюпорта	передача кадров в браузер; «наружу только пиксели» — геометрия не покидает сервер

Термин	Что это простыми словами
WASM / OCP.wasm	ядро в браузере: OCCT и OCP, скомпилированные в WebAssembly; инструмент у клиента без сервера
Zoo / KCL	zoo.dev — CAD с кодом как истиной (язык KCL), облачный движок в США; ближайший по философии проект
Nutenstein / Т-паз	сухарь в паз алюминиевого профиля; интерфейс крепления аксессуаров и кронштейнов
CAPA	Corrective and Preventive Action — цикл корректирующих действий ISO 9001; у нас: рекламация → правило валидатора
Струхаль (St)	безразмерное число частоты срыва вихрей; расчёт гула на поперечинах формулой без CFD
DIN 33402 / ISO 2768	антропометрия (доступность) / общие допуски на чертежах
EX44 / Storage Box / restic	сервер Hetzner (i5-13500, 64 ГБ, FSN1) / хранилище для бэкапов (Хельсинки) / программа резервного копирования
Микроверсия	неизменяемая запись изменения со ссылкой на родителя (Onshape); у нас — операция журнала с хешем родителя
Определение / результат перестроения	что хранится (список операций) / что кэшируется и всегда перестраивается (B-Rep, сетка); истина — определение
Устойчивое изменение	операция адресует элемент по постоянному признаку, а не по позиции — применима к другой версии исходника
Переигрывание журнала	применение всех операций к новой ревизии исходной детали; Ranger-кронштейн v2 получает те же правки
Геометрический отпечаток	адресация грани или отверстия по типу, нормали, центру, площади — замена постоянных ID, которых в OCCT нет
Проблема топологического именования	номера граней меняются при перестроении; известная беда FreeCAD; у нас решается отпечатком для листовых деталей
Ветка / слияние журнала	варианты изделия как ветки списка операций; слияние без конфликтов — «источник побеждает» (правило Onshape)
Геометрический diff	сравнение двух версий: грани добавлены, удалены, сдвинуты — подсветкой в просмотрщике
FeatureScript	язык собственных операций Onshape; подтверждение, что «операция как код с параметрами» — верная абстракция

История ревизий

Рев.	Дата	Что добавлено
v25	31.08.2026	цеховая практика, сборочные проверки, закрыты классы «физических» и «геймдев» идей
v26	03.09.2026	15а инструмент реверса recada.py; 15б редактор изделия; три критерия приёмки; три исправленные ошибки
v27	03.09.2026	15 переписан: роль FreeCAD и инженера, идея workbench; 15в библиотека и сервер; риски и дорожная карта по практике; Zoo
v28	03.09.2026	как Zoo стримит; свой движок: ядро нет, обвязка да
v29	03.09.2026	ядро напрямую без FreeCAD; создано с ИИ, проверено реальностью; просмотрщики на OCCT
v30	03.09.2026	решение: каскадный выювер на сервере, наружу только пиксели; достаточность EX44; защита данных
v31	03.09.2026	версии ядра 7.8/7.9/8.0; STEP на границах; STEP с именами как требование
v32	03.09.2026	15г инструкция по монтажу как артефакт: разбор Defender 110, инструменты, четыре слоя
v33	03.09.2026	15д два мира: B-Rep и сетка; FBX, GLB из OCCT, Blender
v34	03.09.2026	15е данные: шесть источников, два каталога, единая структура, заводская система координат, четвёртый критерий
v35	03.09.2026	опция: реверс из STL; входной контроль как пятый критерий
v36	04.09.2026	15ж конкуренты как источник данных; история ревизий
v37	04.09.2026	15з проверки уровня изделия: размещение, доступность, высота, настройка
v38	04.09.2026	15и дизайн продукта: что даёт система — покупатель, конструктор, эксплуатация, бренд
v39	04.09.2026	15к обратная связь из поля: рекламации, опыт покупателей, соцсети; шестой критерий
v40	04.09.2026	Aufbaurichtlinien как первый источник ограничений; ссылки в правилах валидатора
v41	04.09.2026	легенда дополнена терминами v26–v40 (26 понятий)
v42	04.09.2026	15л модель версий: уроки Onshape — микроверсии, устойчивые изменения, переигрывание, ветки без конфликтов; легенда

1. Идея и исходная ситуация

RECADA (Аугсбург) производит автомобильные багажники Airholder: платформа из алюминиевых экструдированных профилей (профили на складе, сечения нарисованы один раз) + гнутые ноги из нержавеющей стали 1.4301 (2-3 мм); резка и гибка — аутсорс (Blechcon.de). Узкое место — ноги под каждую машину и аксессуары. Цель: система, где на входе крыша (STL-скан с точками крепления или STEP от OEM), на выходе — производственные файлы, обновлённый конфигуратор и инструкции; дизайн управляется по промпту; работа командная с версионированием; знания накапливаются; исполнители — удалённые инженеры из разных стран, отбираемые по результатам тестовых работ.

2. Архитектурный принцип и слои

Источник истины — параметры и код, а не геометрия. Файлы FreeCAD/STEP — артефакты сборки. Это даёт промпт-управление (LLM меняет числа в JSON, не двигает грани), читаемые Git-диффы, командную работу без конфликтов бинарников, автоматическую пересборку производных.

Слой	Содержание
1. Паспорт автомобиля	JSON из STL/STEP (один раз): точки крепления с нормальями, углы, межосевые; для деталей, повторяющих крышу (windshield), — опорные поверхности как сплайн-аппроксимация (не сырая сетка); поле точности geometry_source. Сырой скан — в архив, роль: контрольный эталон для проверки зазоров.
2. Скелет + MasterParams	Точки, оси, плоскости, главные параметры (H, alpha). Всё «твёрдое» читает размеры отсюда. Скелет — мост между паспортом машины и паспортом изделия. Железное правило скелетного метода: детали никогда не ссылаются друг на друга — только на скелет (иначе связи рвутся непредсказуемо); направление зависимостей строго сверху вниз: MasterParams → Skeleton → детали.
3. Каталог профилей	Сечения один раз (импорт DXF); параметр — длина резки; «ширина от длины» — правило.
4. Генераторы (build123d)	Код строит детали от скелета; материал, R3, покрытие зафиксированы; библиотека «кубиков» (bent_flange, hole_array, bolt_joint) прячет сложность.
5. Валидатор DFM+	Правила Blehcon (отгибы, радиусы, развёртка, коллизии) + зазор до крыши ≥20 мм (статический запас вместо расчёта деформации кузова) + упаковка по лимитам канала доставки (текущий канал GLS: ≤40 кг/коробка — главный лимит, масса считается по коробкам комплекта с раскладкой в BOM; длина до ~2 м практически, пороги надбавок — из тарифа GLS в rules/) + крепёж (таблица болт/гайка, проверка зацепления). Красный — артефакты не собираются. Физическая калибровка правил гибки (FEA-in-the-loop): CalculiX симулирует сам процессгиба и показывает, при каком радиусе напряжение на внешнем волокне грозит микротрещинами у 1.4301; расчёт делается один раз для сетки «толщина × радиус × марка» → таблица допустимых R в dfm_blehcon.json → валидатор смотрит в неё мгновенно. Так справочное «R ≥ 1xt» заменяется на подтверждённое расчётом и практикой поставщика. Проверка против реальной оснастки цеха (CAM-in-the-Loop в практической форме): у Blehcon запрашивается список доступных пуансонов и матриц (радиусы, ширина V-паза, максимальная длинагиба) и заводится таблицей в dfm_blehcon.json — валидатор отвечает «R2.5 нет, ближайший R3, пересчитываю K-фактор» и проверяет минимальную длину фланца, чтобы деталь не проваливалась в матрицу, ещё до отправки заказа. Генерация G-кода для их прессы не входит в систему — станок программирует поставщик.
6. CI-сборка	STEP/DXF → Blehcon (перед заказом автоматический раскрой: SheetNest / nest2d / CAD-N, для больших партий u-nesting на Rust с Python-интерфейсом — отходы, проверка счёта, учёт ширины реза kerf из dfm_blehcon.json); GLB → конфигуратор; студийные рендеры (Blender headless) → Shopify; PDF/HTML → инструкции; BOM → цены и склад.

recada-cad/			
└─ vehicles/	паспорта машин	└─ products/	конфигурации (params.json)
└─ catalog/	профили, крепёж	└─ accessories/	аксессуары и адаптеры
└─ rules/	DFM, правила	└─ ci/	пайплайны сборки
└─ generators/	build123d + кубики		

Версионирование: Gitea (self-hosted) + Git LFS; .FCStd — через zippey (читаемые диффы). Релиз = git-тег с персональной подписью ревьюера. Новая машина = паспорт + params.json — механизм масштабирования.

3. Файлы и форматы: как устроена истина

Никакого собственного формата: истина детали = два обычных файла. params.json — числа и слова (SKU, машина, материал, высота, отверстия), правится блокнотом/промптом. generator.py — Python/build123d, читается как техпроцесс: «лист 120×340×3 → скруглить углы → отверстия по точкам паспорта → фланец 90° R3 → нижний гиб под угол крыши из паспорта». Числа приходят из трёх источников (params / паспорт / каталог материалов), в коде их почти нет. FCStd — не источник, а результат (как .exe при исходниках): CI собирает его для просмотра. Исключение: скелеты и эталоны реверса, построенные руками, — полноценные FCStd-исходники в Git.

Дерево построения не исчезло — оно переехало в текст: порядок строк = порядок операций, но вместо хрупких ссылок на номера граней (Topological Naming Problem) — устойчивые правила (edge="top", точки по именам) и порождающие конструкции (циклы по точкам паспорта, условия). Плюс история с «почему»: каждый коммит несёт причину/промпт («поднять платформу 40 мм — бокс задевает антенну»), чего нет ни в одном GUI-дереве; это же — QMS-след и обучающие данные системы.

Сборки: тот же принцип уровнем выше

Сборочный JSON описывает состав и привязки, но не координаты: детали публикуют именованные интерфейсы («sole», «head» с плоскостью, отверстиями, нормалью), сборка говорит «посадить sole на mount_front_L». Вместо решателя констрейнов (Inventor) — детерминированное вычисление позиций из интерфейсов: ничего не «желтеет» при изменениях. Крепёж — свойство соединения: bolt_joint() сам ставит болт по оси, считает длину из пакета, кормит BOM. Промпт «поднять платформу на 40 мм» меняет один параметр скелета — всё пересобирается. Иерархия: деталь → сборка изделия → конфигурация клиента, один формат и конвейер. Цена подхода: нет свободной кинематики (шарниры — позой-параметром или в песочнице).

Роли форматов и «труба»

JSON+Python (истина) → STEP/FCStd (точная геометрия) → DXF (развёртка) → STL/GLB (сетки)
Вниз — всегда, автоматически. Вверх — только реверс-инжиниринг (дорого, один раз, на входе).

STEP — «PDF мира CAD»: точный, но мёртвый; выход к Blechcon и вход от OEM. STL/GLB — сетки без размеров: печать и показ, никогда для производства и измерений. У каждого производного файла есть родитель-истина (SKU+ревизия в имени); файл-сирота — нарушение процесса. При конфликте прав всегда верхний по трубе, нижние пересобираются. Разнородные исходники (скан машины + чужой STEP багажника) никогда не стыкуются напрямую — каждый переводится в паспорт-JSON, стыковка на языке паспортов; ноги — материализованный мост между двумя паспортами.

FFF-правило (Form-Fit-Function)

Посадка и функция не изменились → новая ревизия того же артикула (взаимозаменяемо, склад смешивает). Изменились → новый SKU с политикой замены. Защищает от зоопарка артикулов и от тихой несовместимости. Исполняется машиной: валидатор сравнивает именованные интерфейсы между ревизиями; «функция сохранена?» — единственный пункт, остающийся под подписи человека.

Справочник типов файлов: что лежит в Git и как с этим работать

Тип файла	Что это	В Git?	Кто и как правит
params.json	Параметры детали/изделия: SKU, машина, материал, размеры, статусы; рядом — spres.yaml: намерение, интерфейсы, ограничения приёмки, non-goals (контракт задачи)	Да, обычный текст — главный источник истины	Инженер (редактор/веб-форма), LLM по промпту; каждое изменение — коммит с причиной; в main только через PR
generator.py и recada_lib	Python/build123d: код построения геометрии; библиотека кубиков (bent_flange, hole_array, bolt_joint)	Да, обычный текст — источник истины	Senior/владелец (+LLM с ревью); пробы в ветке convert/*, squash-merge при приёвке
Паспорта: vehicle_*.json, accessory_*.json	Точки крепления с нормальми, углы, опорные поверхности (сплайны), интерфейсы, масса/ЦТ, geometry_source с точностью	Да — источник истины	Создаются один раз при оцифровке (человек или ИИ-агент, подпись человека обязательна); уточняются при пилотных установках
Сборочные JSON	Состав и привязки по именованным интерфейсам (без координат)	Да — источник истины	Инженер/LLM; те же PR-правила
rules/: DFM, материалы, тарифы	Правила Blehcon, materials.json (1.4301, R3), лимиты GLS, таблица крепежа, пороги FEM	Да — источник истины	Владелец/lead; пополняются из рекламаций и ревью технолога Blehcon (цикл CAPA)
YAML инструкций	Шаги монтажа: деталь, крепёж, момент затяжки	Да	Инженер; CI рендерит PDF/HTML/Unity-сцены сам
.FCStd (FreeCAD)	Два разных случая! (а) Скелеты и эталоны реверса — построены руками; (б) просмотревые сборки — построены CI	(а) Да, через zipреу (читаемые диффы) + LFS; (б) НЕТ — артефакт	(а) Владелец/senior в FreeCAD; (б) не редактируется никогда — пересобирается
STEP / DXF	Точная «мёртвая» геометрия: обмен с Blehcon и приём от OEM/исполнителей	Входящие — архив (LFS) как сырьё; исходящие — НЕТ, артефакты CI с SKU+ревизией в имени	Не редактируются; исходящие уходят Blehcon только из CI по тегу; входящие — через извлечение в паспорт
STL / GLB	Сетки без размеров: печать прототипов (STL с ID получателя), конфигуратор (GLB огрублённый)	НЕТ — артефакты CI	Не редактируются; для производства и измерений непригодны принципиально
Сканы крыш (STL), STEP от OEM	Сырьё оцифровки	Архив в LFS (один раз)	Не редактируются; роль — контрольный эталон зазоров и источник паспорта
ВОМ, catalog.json, рендеры, PDF-инструкции	Производные для склада, конфигуратора, клиентов	НЕТ — артефакты CI (хранилище артефактов; релизные — вечно)	Не редактируются; изменения — только через правку истины и пересборку
Отчёты испытаний и FEM	Протоколы физических испытаний, эталонные расчёты (статика, модальный)	Да (LFS) — прикрепляются к релизному тегу	Только добавляются; связь «ревизия ↔ протокол» = QMS-след

Три железных правила для всей команды: (1) редактируется только истина (JSON, .py, паспорта, rules, YAML, скелеты) — всё остальное пересобирается, файл-артефакт руками не трогается никогда, даже «быстро поправить»; (2) у файла без SKU и ревизии в имени нет права покидать сервер; (3) при расхождении версий прав всегда тот файл, что выше по трубе истины — нижние пересобираются, а не чинятся. Нарушение правила 1 (ручной STEP в производство мимо params) — главный риск смерти системы, поэтому отправка на Blehcon технически возможна только из

CI-артефактов релизного тега.

4. Как проектирует человек

Принцип «шаблон, не копия»: дерево/генератор строится из конструктивного замысла (база → полки → гибы → крепёж, каждый размер осмыслен и привязан к параметру), а не как копия всех артефактов конкретной штампованной детали — копия хрупка и ломается при больших изменениях, шаблон держит. Путь 1 — новый тип детали: творческий поиск руками в песочнице FreeCAD (мышкой, как привык) → готовая конструкция становится измеримым эталоном (объём, масса, точки поверхности) → перевод в код по шагам (контур → сверка → гибы → сверка → отверстия → сверка), каждая попытка автоматически сверяется с эталоном; пробы живут в отдельной ветке и сплющиваются в один коммит при приёме; 3 неудачи LLM подряд → эскалация человеку. Путь 2 — повседневный: правка чисел в params (редактор/форма/промт) → пересборка → просмотр; CAD превращается в место просмотра. Путь 3 — LLM-переводчик: человек описывает словами/эскизом, Claude пишет build123d по образцам библиотеки, CI собирает, метрология возвращает расхождение, LLM чинит.

Классы деталей по стоимости перевода

Класс	Перевод в систему	Трудозатраты
Профили (алюминий, прокат)	Импорт DXF-сечения + extrude; параметр — длина	час на каталог
Гнутый лист (ноги, адаптеры)	Реверс техпроцесса в код; быстрее с библиотекой кубиков	часы-дни
Литые/скульптурные	НЕ переводить: паспорт интерфейсов (20 мин) + STEP как мёртвый референс; офсеты от опорных поверхностей при необходимости; полный реверс — только если планируется семейство размеров	минуты
Покупное (крепёж)	Библиотеки стандартных деталей build123d	0

Правило границы внутри детали: форма — руками (один раз), интерфейсы и адаптация — кодом. Люди в системе остаются для четырёх ролей, где машина слаба: постановка задачи (знание реального мира), топология («как вообще решить»), суждение («валидно, но глупо» — подпись ревьюера), обучение системы (опыт → правила). Час «обвести контур» система обнуляет; час «понять, как обойти рейлинг» становится вечным активом.

Вход открыт для любого CAD: исполнитель рисует в SolidWorks/Inventor/Catia/FreeCAD — сдаёт STEP + чертёж с размерами; перевод в код не зависит от исходного CAD. Требовать build123d от конкурсантов = сузить пул вдесятеро. Лицензии: проверить чужую лицензию невозможно — декларация в договоре переносит ответственность, а VDI-сессия снимает проблему полностью (легальное рабочее место без единой лицензии у исполнителя) и очищает цепочку поставок для ISO/GeschGehG. Субподряд безопасен по построению: оплата за деталь, прошедшую валидатор; аккаунт персонален (сессии из двух стран видны в логах); на лестнице доверия субподрядчик не растёт.

Инженерный задел: что уже проверено практикой

Реверс-инжиниринг с метрологической приёмкой (point-sampling по контрольным точкам): Bracket_L — 100% совпадение; Bracket_R — зеркало, 99.12%; wind_side_v2 — 100.000% по 88 точкам; Part55 → новый Bracket_88_W30 с полным DFM-контролем; узел Defender 110 (LRDE-2BR1) — 99.9994%, SheetMetal-дерево от скелета. Материал везде 1.4301 2B, $t=3.0$, К-фактор из таблицы. Критический урок сессий: установка networkx включила SheetMetal Unfolder V2, который показал истинные углыгиба 99.389° и 135° вместо ошибочно измеренных V1 80.6° и 45° (дополнительные углы) — ошибка с прямыми производственными последствиями; правило: развёртки только через V2. Словарь конструкции зафиксирован: полка (Flansch) — боковые грани с отверстиями, стенка (Steg) — центральная грань с логотипом.

Выученные технические правила (в skills): SMBendWall падает на прерванных гibaх → Revolution или реконструкция из face-призм; extend задавать до навешивания дочерних стенок (иначе TNP рвёт привязки); упавший конструктор оставляет null-объект — удалять немедленно; boolean cut ненадёжен для верификации — только point-sampling через distToShape; перед поиском кромок — полный touch()+recompute (кэш SheetMetal не сбрасывается сам); привязки только через SubShapeBinder (защита от TNP); для деталей с формовками — двухконфигурационное дерево (плоская модель для развёртки + финальная с формовкой). Модули к установке: SheetMetal 0.8.22 (Solid-to-SheetMetal, folding marks для прессы Blehcon, индикация битых ссылок), Defeaturing WB (срезать фаски в зоне гiba → развернуть → вернуть вырезы), Curves WB (чистка B-Spline-граней из STEP Inventor), networkx. Материалы — Material Definition Sheet (таблица R/T → К-фактор вместо жёсткого $K=0.42$): одна таблица питает и Claude, и параметрические модели. Unattended Unfold — headless-развёртка для CI. Точка входа репозитория — CLAUDE.md: описание изделия, материалы по умолчанию, какие skills когда применять.

Валидатор с автопочинкой: следующая ступень DFM

Правила оцифровываются в три слоя: числа → dfm_blehcon.json ($R=1 \times t$, мин. полка 15 мм для нержавеющей, отступ отверстия от гiba, Entlastungsnut, зазоры $\geq t$, лимиты листа, GLS-габариты); исправления → features.py (генераторы разгрузок: овал, Entlastungsnut, угловая разгрузка); методики → skills (markdown: «как думать»). Валидатор не только говорит «ошибка: отверстие близко к гibu», но предлагает исправление: «конфликт → предлагаю relief_obround, вот превью» — в RECADA-workbench это красная подсветка + кнопка «исправить», в CI тот же код headless блокирует выпуск неисправленного. Калибровка библиотеки — по реальному производству: принятые Blehcon детали с их правками разгрузок обмеряются (простой реверс), формулы «размер разгрузки от $t/R/d$ » зашиваются в features.py; каждое письмо-исправление от Blehcon — строка в dfm_blehcon.json, и ошибка не повторяется ни у кого. Дизайн по правилам перестаёт зависеть от того, помнит ли инженер PDF поставщика.

Реверс без GUI: STEP → Python-код (метод и стек)

Дерево построения как таковое не нужно — нужен Python-код: он хранит ту же последовательность операций, но без хрупких ссылок на грани (TNP), с циклами и условиями, диффами и историей «зачем». Просмотровое дерево CI может собрать для глаз, но истина — код. Вся труба реверса работает headless (build123d/OCP — то же ядро OpenCASCADE, что у FreeCAD): без GUI, без MCP-сессий, повторяемо и пригодно для CI (десять STEP за ночь).

Алгоритм автоматического обмера (step_probe.py): обход B-Rep через TopExp_Explorer → классификация граней (плоские = полки/стенки, цилиндрические = гiba, узкие торцевые = толщина) → построение AAG (атрибутированный граф смежности граней, networkx): узлы — грани, рёбра — сопряжения → отсечение торцевых граней расщепляет граф на две изолированные эквидистантные оболочки (верх/низ), их сопоставление даёт нейтральную поверхность и толщину t → извлечение параметров гибов (радиус, угол, ось; numpy: нормали, PCA осей), отверстий (цилиндры с осями и D), внешнего контура. Выход — measurements.json.

Скелет детали — главный результат обмера и основа параметризации

Ключевое решение: обмерщик выдаёт не «список размеров», а СКЕЛЕТ детали — срединное представление без толщины: пластины (плоскости фланцев с контурами) + линии гiba (оси, углы, радиусы) + толщина как ОДИН параметр ($t = 2 \times$ расстояние от срединной поверхности до

границы). Реверс превращается из «восстановления формы» в «восстановление скелета», и это даёт три эффекта. (1) Толщина перестаёт быть геометрией: смена 3 мм → 2 мм — правка одного числа, а не перестроение всех поверхностей (актуально: применяются обе толщины). (2) Скелет детали и общий Skeleton сборки говорят на одном языке — плоскости и линии, поэтому связка «изменил H платформы → пересчитались углы фланцев ноги» становится геометрически прямой: линиягиба лежит на пересечении плоскостей, заданных скелетом сборки. (3) Параметризация осмысливается почти сама: длины пластин, углы между ними и положения линийгиба — ровно те величины, что меняются от машины к машине, а артефакты производства (кern-метки, случайные скругления) в скелет не попадают вовсе — схлопываются вместе с толщиной. Medial Axis фильтрует шум за инженера.

Реализация — без «настоящего» Medial Axis Transform (в OCC штатной функции нет, устойчивое построение срединных поверхностей на реальных B-Rep нетривиально): скелет строится из уже существующего AAG — пары эквидистантных граней дают срединные плоскости, цилиндрыгибов дают срединные оси и радиусы. Результат идентичен, а код — тот, что и так спроектирован. Скелет детали сохраняется в measurements.json как основная структура; дальше на него навешиваются параметры (spec.yaml) и правила (rules/).

Кривизна как устойчивый детектор гибов и формовок

Второй, независимый от описания поверхности критерий: для каждой грани считаются главные кривизны и производные величины — плоскость даёт гауссову $K=0$ и среднюю $H=0$; цилиндрический гиб — $K=0$ при $H\neq 0$, причём направление нулевой главной кривизны и есть осьгиба, а вторая кривизна даёт $1/R$; формовки и выштамповки — $K\neq 0$ (неразвёртываемые участки). Практическая ценность прямая: критерий работает независимо от того, как STEP описал грань — при экспорте из Inventor плоскости и цилиндры часто приходят B-spline-аппроксимациями, где формального «цилиндра» нет и поиск по типу поверхности проваливается, а кривизна есть у любой поверхности. Бонус: $K\neq 0$ сразу помечает деталь как содержащую формовку, то есть требующую двухконфигурационного подхода, — ещё до попытки развернуть. Порядок в обмерщике: сначала опрос типа поверхности через OCC, при неудаче — замер кривизны.

Автопроверка корректности развёртки (Гаусс-Бонне): для правильной плоской развёртки сумма угловых дефектов по контурам даёт 2π ; отклонение означает топологически неверную развёртку — складки или самонакладки. Одна формула в приёмке развёртки: дешёвая страховка, ловящая грубые провалы анфолдера автоматически, без человеческого взгляда на DXF (метрологию не заменяет).

Что автоматика НЕ делает: выбор, какое число — параметр (высота, меняется от машины), какое — правило ($R3$ всегда), какое — формула (ширина от длины), а какое — артефакт производства, который не воспроизводится. Это конструктивный замысел; его расставляет человек или Claude со skills, читая measurements.json как текст. Далее — spec.yaml + generator.py + params.json.

Детектор разгрузочных вырезов (Entlastungsschnitte / bend reliefs)

Разгрузки предотвращают разрыв и смятие металла при гибке, но усложняют топологию — именно они вызывают «прерванные гибы», на которых падал SMBendWall и путался Unfolder V1. Распознавание в три шага, встраивается в тот же обмерщик: (1) дешёвая эвристика по контурам и рёбрам гранигиба — канонический гиб имеет 1 контур и 4 ребра; больше одного контура = сквозной вырез внутригиба, больше четырёх рёбер = вырезы по краям; (2) паттерн в AAG — идеальный гиб смежен ровно с двумя плоскими фланцами, разгрузка добавляет ему в соседи мелкие торцевые грани или разрывает цилиндр на несколько соосных (поиск подграфа в уже построенном графе, ничего нового не требуется); (3) UV-проекция границгиба на цилиндр — отклонение от прямоугольника даёт точные размеры выреза (глубина, ширина, отступ); применяется только к найденным случаям.

Ключевое отличие от «просто копирования»: в системе разгрузка — это ПРАВИЛО, а не форма из оригинала. Генератор вычисляет её по толщине, радиусу и типу узла (features.py), а не переносит контур. Поэтому у детектора две роли: сигнал «этот узел технологически требует разгрузки» (иначе валидатор выдаст конфликт и предложит relief_obround) и источник

калибровки — обмер разгрузок на деталях, принятых Blechcon, даёт реальную зависимость «размер от $t/R/d$ », которая зашивается в features.py навсегда. Третий выигрыш практический: знание «на этом гйбе прерывание из-за разгрузки» позволяет автоматически выбрать проверенный обход развёртки (Revolution вместо SMBendWall либо Defeaturing: срезать вырезы → развернуть чистый гйб → вернуть вырезы плоскими) — то, что сегодня решается руками в каждой сессии, становится ветвью в коде. Инструменты те же: OCP (TopExp_Explorer, BRepAdaptor_Surface) + networkx; отдельный pythonocc-core не нужен — то же ядро уже доступно через OCP.

Гибрид «точные числа + зрение» и агентная петля коррекции

Ключевое дополнение к обмерщику: геометрия и семантика извлекаются разными средствами и соединяются. OCC/AAG/FTG дают точные числа (толщина, радиусы, углы, координаты отверстий) — в этом машина безупречна. Рендер детали в 4 ракурсах (проекции + изометрия из build123d) плюс мультимодальная модель дают семантику ролей: «это разгрузка у основания гйба», «это фальц для жёсткости края», «это П-образный кронштейн», «это артефакт штампа, воспроизводить не нужно». Именно семантики не хватало: AAG измеряет, но не знает, что параметр, что правило, а что артефакт. Работает сегодня без обучения моделей и без датасетов — рендер, взгляд, разметка measurements.json, генерация.

Агентная петля автокоррекции (штатный режим реверса): экстрактор → LLM пишет generator.py → CI собирает STEP → сверка с исходным → расхождения возвращаются модели числами («вырез смещён на 2 мм, строка 45») → правка → повтор до сходимости. Стоп-правило прежнее: 3 неудачные итерации подряд → эскалация человеку с дневником попыток (иначе модель крутится вечно). Судья — только числовая метрология point-sampling $\geq 99.9\%$ и точные интерфейсы; визуальный дифф (наложение рендеров оригинала и сборки с подсветкой расхождений) используется как навигация по ошибке и объяснение человеку, но НЕ как критерий приёмки: деталь может «выглядеть одинаково» при расхождении в полмиллиметра на посадочном месте.

Эволюционный подбор параметров — для тех 10–20% случаев, где распознавание сдаётся (свободные радиусы, скульптурные переходы): шаблон пишет человек, числа подбирает оптимизатор (scipy / CMA-ES, без ML), минимизируя ту же метрологическую невязку point-sampling. Дёшево, детерминированно, встраивается в CI как ночной прогон.

Оригами-кинематика и модальная сигнатура

Кинематическая развёртка («жёсткое оригами»): деталь представляется как жёсткие плоские пластины (фланцы) и одномерные шарниры по осям гйбов; последовательные повороты вокруг осей до нулевых углов дают плоскую заготовку. Один алгоритм даёт два выхода сразу: траектория решателя (последовательность поворотов) — это и есть порядок гйбки, а конечное состояние — заготовка. Метод закрывает сразу две задачи: развёртку без анфолдера (углы шарниров = углы гйбов, конечное состояние = контур заготовки) и автоматическую проверку самопересечений при складывании — ту самую Bending Feasibility, которую иначе считает регрессивная развёртка. Реализация — чистая геометрия на numpy (последовательные повороты + тест пересечений); физические движки (PyBullet/MuJoCo) для жёсткого оригами избыточны.

Модальная сигнатура как финальный валидатор реверса: для оригинала и для реверснutoй модели считаются первые ~5 собственных частот (CalculiX). Совпадение спектров доказывает механическую эквивалентность, а не только геометрическую: частоты чувствительны к толщине, радиусам в зонах гйба и распределению массы — то, что точечная метрология может проглядеть. Применяется к ответственным деталям (ноги, несущие кронштейны), необязательно для мелочи; инфраструктура FEM всё равно строится под валидатор, так что чек почти бесплатный. Красивое замыкание: тот же модальный анализ, что уже выполнен компанией, служит и приёмкой реверса, и правилом « $f_1 \geq$ порога по Струхалю» против гула на скорости.

Цеховая практика в коде: базы, прокат, допуски, следы инструмента

Базирование от технологических баз (datums), а не от нуля CAD: деталь описывается от тех плоскостей, от которых её меряет ОТК (базы на поверочной плите, щуп КИМ) и от которых её позиционирует оператор у заднего упора листогиба. Тогда переменные генератора называются `STOP_DISTANCE_X1`, а не `offset_x`, размеры в коде совпадают с контролируемыми на производстве, и цепочка размеров идёт от базы — меньше накопленной ошибки. В `спес.iaml` появляется секция `datums` (базовые плоскости и точки установки).

Направление проката: гиб вдоль волокна даёт микротрещины на внешнем радиусе у нержавеющей — при радиусах, близких к минимальным, риск реальный. Правило связывает конструкцию и раскрой: если осьгиба параллельна направлению проката (оно задаётся ориентацией детали на листе при нестинге), валидатор либо требует увеличить минимальный радиус, либо переориентировать деталь в раскройной карте — и записывает предупреждение в комментарий генератора.

Толщина как распределение, а не число: реальный лист «3 мм» бывает 2.93. Обмерщик замеряет толщину в *N* точках и выдаёт номинал плюс разброс; в генератор идёт номинал, в спеку — допуск с `assert`-проверкой, *K*-фактор считается от фактической толщины. Обмерщик перестаёт спотыкаться на «плавающей» толщине.

Следы матрицы как источник технологии: при воздушной гибке на внешнем радиусе остаются две параллельные линии сопряжения цилиндра и плоскости — расстояние между ними выдаёт ширину *V*-канала, на котором деталь гнули. По чужой детали восстанавливается не только геометрия, но и технология, а радиус сразу привязывается к стандартному ряду матриц (*V* = 6, 8, 10, 12, 16 мм) — прямое дополнение к таблице оснастки поставщика. Проверка коллизий уточняется: не «согнётся ли вообще», а «согнётся ли на этом прессе в этом порядке» — деталь не должна задевать верхнюю траверсу на 2-м и 3-м гйбе (габаритные модели инструмента запрашиваются у Blehcon; фирменные каталоги Amada/Trumpf не нужны). В задел без приоритета: распознавание замков «шип-паз» и зазоров под сварку — актуально, если появятся сварные узлы (сейчас соединения болтовые).

Рассмотрено и отклонено (чтобы не возвращаться по кругу): GNN-распознавание граней (BRepNet/CADNet/Sheet-metalNet) — нет открытых моделей под листовую металл, нужен размеченный корпус в тысячи деталей, точность вероятностная; ваш класс деталей распознаётся правилами детерминированно. ML-предиктор пружинения на FEA-датасетах (ANSYS/LS-DYNA — платные) — решает задачу, которую уже решает гибщик на своём прессе; наш путь — строка в `dfm_blehcon.json` из практики Blehcon. Специализированная VLM «картинка → код» (CAD-Coder) — *research*-модели слабее связи «точные числа OCC + рассуждение сильной модели». EvoCAD (популяция вариантов с VLM-жюри) — дорого по токенам и оптимизирует визуальное сходство вместо размерной точности. Gaussian Splatting с телефона — точность на бликующем металле далека от требований к интерфейсам; практическая версия (фотограмметрия оболочки + штангенциркуль по крепежу) уже принята; вернуться при оцифровке чужих аксессуаров «в поле». Analysis Situs, `pythonocc-core` отдельно, CadQuery — дублируют то, что уже в стеке. Инверсный CSG («воздушный слепок»: вычесть деталь из габаритного параллелепипеда и разбирать отрицательный объём на примитивы) — опирается на булевы операции, которые по нашему же выученному уроку на сложных телах возвращают бессмыслицу; радиусы и отверстия и так берутся прямо с цилиндрических граней. Синтетический лазерный скан STEP + нейросети облака точек (CAD-Recode / Point2CAD) — осознанная потеря точности ради устойчивости к дефектам STEP, которые лечатся *healing*-ом в две строки OCC. Дифференцируемый CAD (SDF + градиентный спуск) — технически рабочий, но решает ту же задачу, что принятый оптимизатор CMA-ES, требуя дифференцируемого рендера и подбора гиперпараметров; вернуться, если CMA-ES упрётся по скорости. Синтез программ через SMT-решатели (SyGuS/Z3) — «доказанная корректность» недостижима: решатели работают с логикой и арифметикой, а не с B-Rep; наша гарантия — измеренная (метрология + *спес*-прогон), а не доказанная. Латентная диффузия CAD-деревьев (GenCAD-3D) и спектр Лапласа-Бельтрами — обучение на миллионах программ / математика для поиска похожих форм; плоскости и цилиндры распознаются напрямую. PINN для динамического *K*-фактора — уравнения пластичности ради числа, которое берётся из Material Definition Sheet и калибруется по принятым Blehcon деталям. RL-агент для развёртки (обучение подбору последовательности

разгибания) — задача уже решена детерминированно дважды: регрессивная развёртка и оригами-кинематика дают порядок гибов и проверку самопересечений за секунды и воспроизводимо. Нейро-символический DSL с AST-валидацией через Z3 — тревога «LLM ошибается синтаксически» снята дешевле: код выполняется в CI (синтаксис падает мгновенно и возвращается модели), семантику ловят валидатор и метрология. INR/SIREN (нейросетевое поле заполненности) — потеря точности ради градиентов там, где точные плоскости лежат прямо в B-Rep. Квантово-вдохновлённый генетический алгоритм — обёртка над обычным эволюционным поиском; принятый CMA-ES делает ту же работу с проверяемой сходимостью. Персистентные гомологии (TDA) — из идеи взята только суть (инвариант целостности) в виде чек-листа сохранности элементов, без алгебраического аппарата. Оптические каустики (трассировка лучей для замера радиуса), голономия/параллельный перенос (двугранный угол получается скалярным произведением нормалей в одну строку), тепловой поток по уравнению Фурье для поиска вырезов (перечисление внутренних контуров дешевле на два порядка) — экзотика ради экзотики. Карта мартенситного превращения ($\gamma \rightarrow \alpha'$ при холодной деформации) — физика верная, но для расчёта нужна симуляция деформации, для которой уже надо знать, где гибы: круговая логика; реальная ценность темы у нас другая — наклёп в зонахгиба влияет на коррозионную стойкость и магнитность готовой детали, это вопрос качества продукта, а не реверса. Класс «фундаментально-физических» методов рассмотрен целиком и отклонён (фаза Берри, поток Риччи/Ямабе, калибровочная теория дефектов, полиномы узлов, обратная задача рассеяния, голографический принцип, симплектическая механика, топологические краевые состояния, функционал Онсагера, сложность Колмогорова): все они решают три задачи — углы и радиусы гибов, развёртка, поиск вырезов — которые уже закрыты кривизной, оригами-кинематикой и счётом контуров с машинной точностью за секунды. Точность системы сегодня упирается не в математику распознавания, а в физику и данные: К-фактор реального листа, компенсация пружинения на конкретном прессе, допуски исходного STEP, точность скана крыши — их эти методы не уменьшают. Читаемость кода (циклы вместо повторов) достигается инструкцией в промпте и ревью, а не вариационной задачей. Класс «геймдев-математических» подходов также рассмотрен и отклонён: IK-риг совпадает с уже принятой оригами-кинематикой (приятное подтверждение естественности решения); SDF-реймаршинг, поток Риччи, shape grammars и Wave Function Collapse, MCTS-поиск кода, воксельные октодеревья, клеточные автоматы — это ранее отклонённые классы в новой упаковке (дифференцируемый CAD, нейро-символический DSL, потеря точности ради устойчивости); краудсорсинговый Foldit требует аудитории игроков, которой нет. Из теории Морса взято только следствие, и так вытекающее из скелетного подхода: строить деталь в коде от базовой плоскости к периферии, а не в произвольном порядке.

Критерий «100% копия с параметрическими изменениями» (в rules/): реверс завершён, когда выполнены все четыре условия — (1) интерфейсы (отверстия, посадочные плоскости, углы) совпадают точно; (2) метрология point-sampling на номинальных параметрах $\geq 99.9\%$ против исходного STEP; (3) прогон на ИЗМЕНЁННЫХ параметрах зелёный у валидатора и спес-теста (доказательство, что параметрика живая, а не декорация); (4) чек-лист сохранности элементов: отверстий было N — стало N, вырезов и разгрузок было M — стало M (считается напрямую: сквозные отверстия — парные цилиндрические грани, вырезы — внутренние контуры; ловит самую обидную ошибку «забыл дырку»); (5) список осознанных отличий от оригинала записан в спеку (кern-метки и случайные скругления не воспроизводятся; технологический язычок воспроизводится, но как правило, а не как копия). Оставшиеся доли процента — обычно К-фактор, точность сплайнов и допуски самого исходного STEP; гнаться за ними — воспроизводить чужие ошибки экспорта.

Стек (только то, что уже в системе): build123d/OCP — чтение STEP и B-Rep; networkx — AAG; numpy — векторная математика; метрология — distToShape point-sampling; развёртка — SheetMetalUnfolder V2 headless (FreeCAD здесь импортируемая библиотека, не среда), с миграцией на YouCanNotUnfold (быстрый анфолдер на networkx, drop-in замена) или встроенную развёртку build123d по мере зрелости; нестинг — SheetNest / nest2d / CAD-N / u-nesting (NFP-алгоритмы с учётом kerf). Отвергнуто как избыточное: pythonocc-core отдельно (то же ядро уже есть через OCP), CadQuery (дублирует build123d), Analysis Situs (тяжёлая C++-платформа ради того, что закрывают ~100 строк на networkx). Пружинение (springback): нержавейка 1.4301

сильно наклёпывается — измеренный на готовой детали угол уже включает отпружинивание; компенсация — забота гибщика, но её реальные значения от t/R стоит завести строкой в `dfm_blechcon.json` из практики Blechcon.

Spec-Driven Development: спека задачи как контракт

Система уже устроена по принципам SDD (истина — спецификация, геометрия — артефакт, валидатор — исполняемая спека ограничений, история «зачем» в коммитах). Дополняем тремя приёмами. (1) Спек до геометрии: для каждой новой детали до первой линии в песочнице пишется `спес.yaml` — намерение (intent), интерфейсы стыковки (из паспортов), проверяемые ограничения приёмки (масса, нагрузка, зазор, целевая себестоимость по BOM) и явные non-goals (чего НЕ делаем). Спек — файл истины в `products/` рядом с `params.json`. (2) Спек → тест → реализация: CI генерирует приёмочный прогон из `constraints` автоматически ещё до начала работы; красный прогон на пустой детали — норма, работа исполнителя = сделать его зелёным; приёмка превращается из «проверить сданное» в «позеленить спеку», субъективность ревью сжимается до вопроса «валидно и не глупо?». Спек = формальное основание сдельной оплаты — контракт чище любого текстового ТЗ; спор «деталь не та» превращается в «спека была неполна», и чинится спека, обогащая шаблон. (3) LLM работает от спекы, не от чата: промпт сначала материализуется в `спес.yaml` (Claude сам оформляет), человек подтверждает за секунды, потом генерация — намерение зафиксировано в Git до реализации, «LLM понял не так» ловится на спеке, а не на геометрии; правило зашивается в `rules/` и в системный промпт RECADA-ассистента. Внедрение: этап 2, рядом с валидатором (генератор приёмочного прогона — малый скрипт CI).

Сборка: проверки уровня изделия

Детали собираются в багажник, поэтому у сборки свой слой проверок — отдельно от геометрии деталей. Позиционирование уже описано (именованные интерфейсы вместо констрейнов, всё от скелета); добавляются четыре проверки, все — геометрия и арифметика, без физических движков и симуляции монтажника.

Проверка	Что делает и зачем
Доступ инструмента (assembly feasibility)	Для каждого болтового соединения проверяется свободный цилиндр доступа: прямой канал от оси болта наружу под головку ключа (диаметр, длина хода) и вылет для установки стержня. Ловит классическую ошибку «спроектировано, но не собирается»; критично, потому что монтаж идёт на крыше в неудобной позе. Заодно проверяется, что деталь заводится на место при уже смонтированных соседях.
Размерные цепи (tolerance stack-up)	Платформа стоит на четырёх ногах: допуск гибки ($\pm 0.5\text{--}1^\circ$), допуск отверстий лазера, разброс крыши — сумма даёт перекося или несведение отверстий на последней ноге. Система проходит цепочку «крыша → нога → профиль → следующая нога» по худшему случаю и статистически (RSS) и выдаёт минимальный необходимый овал отверстий. Снимает целый класс рекламаций «не встало».
Автопорядок монтажа	Последовательность выводится из графа связей (нога к крыше → профиль к ногам → аксессуар к профилю) с учётом проверки доступа, а не пишется руками. Инструкция генерируется автоматически и всегда актуальна; Unity-конфигуратор получает готовую последовательность для интерактивной 3D-инструкции. YAML остаётся для человеческих подсказок («не затягивать до установки задних ног»).
спес.yaml сборки	У изделия тоже есть контракт приёмки: суммарная масса, допустимая нагрузка, число уникальных SKU (метрика унификации — чем меньше разных деталей, тем дешевле склад), оценка времени монтажа по числу крепежа, совместимость аксессуаров. Приёмка сборки — такой же зелёный прогон, как у детали.

5. Конфигуратор (Unity + Shopify) и инструкции

Конфигуратор разрабатывается на Unity (WebGL для сайта; из того же проекта — нативные мобильные приложения с AR-примеркой через AR Foundation и десктоп для дилерского киоска/выставки). Контракт CI ↔ фронтенд не зависит от движка — `catalog.json`: SKU, ревизия, статус, GLB, точки стыковки, варианты, правило замены; Unity грузит GLB в рантайме через

glTFast, attach-точки читаются как named nodes. Возможность «техпроцесс в конфигураторе»: Unity-сцена визуализирует сборочные шаги из тех же YAML-инструкций — интерактивная 3D-инструкция вместо PDF. Риски Unity-WebGL: тяжёлый билд (15-50 МБ против 2-5 у three.js) — следить за временем первой загрузки на мобильном (~5 с порог); при провале — гибрид: лёгкая витрина-превью + полный Unity-конфигуратор. GLB сжимается (gltfpack+Draco: десятки КБ), ревизия в имени файла против кэша CDN. Клиенты видят только протегированные релизы. «Светофор нагрузки»: суммирование масс аксессуаров против допустимой нагрузки крыши — рост конверсии, все данные уже в каталоге. Инструкции из YAML (шаг, детали, крепёж, момент) рендерятся CI с актуальными изображениями; конфигурация клиента известна — инструкция генерируется под его заказ. Конфигуратор на базе FreeCAD для розницы отвергнут (секунды на пересборку, ферма контейнеров, мобильные): розница = pre-built GLB, мгновенно; VDI-FreeCAD с панелью RECADA = CPQ-инструмент для дилеров/нестандарта, выход — params.json сразу в производство.

6. Прототипирование: четыре ступени

Ступень	Что проверяет	Срок/цена ошибки
1. Цифровой	Коллизии, FEM (CalculiX+Gmsh в валидаторе), AR-примерка на машине (model-viewer, тот же GLB)	минуты / 0 €
2. Печатный	--target=proto → STL, FDM 1:1 (PETG): посадка, отверстия, помехи; ID получателя выдавлен на нелицевой стороне; принтер 300-500 € окупается первой итерацией	часы / ~2 €
3. Металл (DC01)	Blechcon как прототипная мастерская; material_override: DC01 вместо 1.4301 (2-3× дешевле); маркировка PROTO not for sale	дни / десятки €
4. Пилотный комплект	Боевой материал, установка, фотофиксация → правки в паспорт и DFM-правила: цикл обучения замкнут	недели / сотни €

7. Аксессуары: вторая ось

Боксы, маркизы, Starlink, LED-бары, солнечные панели. Ключ — стандартизованный интерфейс платформы (Т-паз, шаг): аксессуар привязан к интерфейсу, не к машине — спроектирован один раз, подходит всем. Паспорт аксессуара: крепление, объём + зоны исключения, масса и ЦТ (валидатор считает суммарную нагрузку конфигурации), совместимость. Для покупных изделий проектируется только адаптер — тот же конвейер. Оцифровка: STEP от производителя (дают дилерам) или скан — фотограмметрия для оболочки ($\pm 1-2$ мм, глянец матировать) + штангенциркуль для крепежа (± 0.05); поле точности в паспорте, неточность компенсируется конструктивно (овальные отверстия). Печатная примерка ловит ошибки оцифровки за 2 €. Библиотека паспортов популярных аксессуаров — накапливаемый актив.

8. Кадровая лестница: рост по результатам в логах

Ступень	Доступ	Переход
Новичок	Тестовые и простые задачи, только VDI, сдельно	вход свободный
Проверенный	Прямые заказы, ставка выше	3+ принятых работы
Senior	Сложные узлы, Git-доступ, проектная оплата	устойчивое качество работ + коммуникация
Lead/reviewer	Первичная приёмка, наставничество, ТЗ; решает bus factor	отдельный отбор по качеству мышления в комментариях (принцип Питера: лучший чертёжник ≠ лучший ревьюер)

Одна удачная работа — шум, паттерн на 4-6 задачах — сигнал. Система логирует: качество вопросов к ТЗ, итерации до зелёного, поведение при проигрыше, экономическое чутьё. Повышение вычисляется, а не назначается — прозрачность правил сильнее премий на рынках СНГ/Азии. Финальное доверие (доступ к ядру) — личное решение.

9. Наём в разных странах: рынки и ставки

Рынок	€/час	Роль
Индия	4-10	Основной пул: глубина, английский, бюро sheet metal (Пуна/Ченнай/Бангалор), UTC+5:30. Пинг 100-160 мс — фильтровать пробной сессией.
Узбекистан/Кыргызстан	5-12	Русский трек: ГОСТ-школа, лояльность; отсюда вырастут постоянные и lead. Пинг 60-90 мс — VDI комфортен.
Пакистан	3-7	Добавочные руки строго сдельно (свет/интернет — риск исполнителя; PayPal нет).
Вьетнам	5-12	Отложить (язык, UTC+7, пинг 180-250); стратегичен при азиатском векторе производства.
Россия	—	Напрямую нет (платежи, комплаенс); легально — релоканты (Армения/Грузия/Казахстан) или ИП в третьей стране; Kasm по HTTPS работает при любых блокировках.

Модель найма: удалённые инженеры-конструкторы на сдельной основе (оплата за деталь, прошедшую валидатор) с ростом до постоянного сотрудничества. Воронка: 100 приглашений → 30 откликов → 15 тестов → 8 сдали → 3-4 прошли → 1-2 на скамейку; цена постоянного ~300-500 €. Каналы: Upwork (активные приглашения на платный тест), hh.uz, GrabCAD, кафедры вузов, рефералы. Оффер-магниты: платный тест; не нужен софт и мощный ПК (браузерная сессия — заодно легальность и доступ пула без железа); автоматическая приёмка по опубликованным правилам; прозрачная лестница; постоянный поток. Ступенчатый отсев: фильтр-вопрос → платный тест с автоприёмкой (эталон Bracket_L) → лично смотрите 3-4 из ста. Тест включает 10-мин пробную VDI-сессию (меряет реальный канал кандидата).

10. Жизненный цикл: две оси

Конструкция (status)	Склад/продажа (sales_status)
Draft / Черновик — в работе, снаружи не видна In Review / На проверке — валидатор зелёный, PR открыт Released / Выпущена — подпись + тег + Rev; единственный производимый статус Superseded / Заменена — вышла новая ревизия (автоматически); хранится вечно Obsolete / Снята — негодна, преемника нет; производство блокирует CI On Hold / Заморожена — остановлена без решения	Not for Sale — прототипы (PROTO), пилоты Active — производится и продаётся Run-out — superseded, остаток >0: продаём, не дозаказываем; webhook Shopify при нуле включает преемника Discontinued — снята; карточка живёт вечно (гарантия, QR-инструкции) Service Only — по обращению как запчасть к проданному

Политика замены A→B выбирается при релизе: run-out / немедленная (дефект) / параллельно (FFF: та же посадка и функция = ревизия, не новый SKU). Ось 1 движет CI по git-событиям; ось 2 — webhook Shopify + два ручных решения.

11. Изменение деталей: где дорого

Создание дешево; изменение дорого пропорционально зависимостям. Три тяжести: в существующих параметрах (бесплатно) / новый параметр (правка генератора — узкое место квалификации) / слом топологии (= новая деталь; правило «больше N строк — новый шаблон» против костылей). Каскад (развёртка, масса и нагрузка конфигураций, GLB, инструкция, BOM) CI пересобирает сам; управленческими остаются: неприкосновенность интерфейса (изменение = «версия 2 платформы»), явная политика замены на складе, запрет обходов мимо params (STEP на Blehcon — только из CI, технически). Плюс: геометрический дифф в PR (подсветка изменений старый/новый STEP), версионирование библиотечных блоков с явной миграцией, шлюз на изменение released (issue с обоснованием + go владельца).

12. ISO 9001

Система = исполняемый QMS: 8.3 (входы=паспорт+ТЗ, выходы=артефакты CI, верификация=валидатор, валидация=прототипы, изменения=PR+ревизии); 8.5.2 прослеживаемость (деталь → тег → автор → ревьюер → заказ); 7.5 документация = Git; 10.2 CAPA (рекламация → issue → правило валидатора навсегда). Фрилансеры = внешние поставщики (8.4): страница критериев допуска/оценки/отстранения (данные собирает Gitea), объём контроля привязан к лестнице (риск-ориентированность), компетентность (7.2) = конкурсная история, ревьюеру — чек-лист и персональная подпись. GDPR: обработка данных фрилансеров (аккаунты, логи) — пункт в договоре, запись в Verzeichnis, срок хранения логов. Сертифицироваться — когда спросит рынок (B2B/OEM): фундамент ISO-ready, формализация 2–3 мес, ~3–6 т.€. Правило: документируется исполняемое или используемое — иначе театр качества.

13. Физические испытания и ISO 11154 (новый трек)

Слепая зона, закрытая внешним аудитом: система проектирования не заменяет испытаний готового изделия. Даже если съёмный багажник юридически классифицируется как груз (Ladung, §22a StVZO — проверить у юриста, не принимать на веру) и не требует ABE/Teilegutachten, отсутствие документированных динамических испытаний по ISO 11154 (включая City Crash, ускорения до ~16g) при аварии превращает Produkthaftung в персональный риск руководства и закрывает вход в B2B-дилерские сети. Действия: (1) выяснить текущий статус испытаний продукта; (2) при отсутствии — отдельный испытательный трек: эталонные испытания базовой конструкции в аккредитованной лаборатории (бюджет — тысячи €, это цена входа в B2B); (3) расширить FFF-правило пунктом «изменение, влияющее на несущую способность, требует переиспытания» — валидатор помечает такие изменения автоматически; (4) прослеживаемость «какая ревизия испытана» система уже даёт бесплатно (git-тег + протокол испытаний как артефакт релиза).

Текущий статус и расчётная база

Компанией уже выполнены прочностной (статический) и модальный анализы конструкции; планируется аэродинамический. Разграничение: расчёт (FEM) и физическое испытание по ISO 11154 юридически не взаимозаменяемы — расчёт говорит «должна выдержать», протокол испытания документирует «выдержала»; для Produkthaftung и B2B нужен физический протокол, а расчёты — сильное дополнение, удешевляющее сертификацию (меньше итераций в лаборатории). Модальный анализ: собственные частоты против частот вихревого срыва на 100–130 км/ч (гул, резонанс, усталость) — превращается в правило валидатора «первая собственная частота ноги $\geq$ порога» (порог по формуле Струхалья из скорости и размера профиля; CalculiX умеет модальный анализ штатно). Аэродинамика прагматично: ветровые нагрузки как входные силы прочностного расчёта — нормативные формулы без CFD; частоты срыва — Струхаль; полный CFD (OpenFOAM) — разово для формы windshield и гула, вне конвейера. Существующие отчёты — эталоны калибровки CalculiX-пайплайна: прогнать ту же деталь, сверить частоты и напряжения — валидатор рождается проверенным (логика метрологического эталона Bracket_L, но для физики).

14. Открытая платформа сообщества

Печатаемые аксессуары сообщества (держатели, клипсы) делают платформу «липкой» и служат разведкой спроса (популярная модель → задача на металлическую версию). Публикуется открытая спецификация интерфейса (измерима штангенциркулем; опубликовать первым = стать стандартом; управление — у вас, модель USB); публичный репозиторий + STL; автопроверка посадки тем же конвейером; категория Community в конфигураторе. Защита (Produkthaftung): CC BY-NC-SA + disclaimer (вы хостинг, не производитель), автомодерация категорий (несущее на скорости — на свой риск/не публикуется), витринная граница «металл протестирован / community на свой страх». В правилах — право Airholder на металлическую версию по мотивам (с упоминанием автора). Сообщество = нулевая ступень кадровой лестницы. Веб-визуализация не раскрывает ИС: в браузер уходит огрублённый GLB («фотография часов, не чертёж»); децимация — параметр CI; точная геометрия покидает сервер единственным маршрутом CI → Blechcon. От обмера купленного изделия не защищает ничто — реальная защита: скорость конвейера, паспорта, библиотека решений, валидатор, скамейка, стандарт.

15. Роль FreeCAD и инженера: кто что делает

Позиция уточнена по итогам практики. Инженер из системы не уходит — он остаётся автором формы. Полноценный CAD мы не пишем: это не наш продукт и не наша экспертиза. Но новые детали делать надо, и делать их надо руками — в FreeCAD. Инструмент recada.py не заменяет конструктора, он снимает с него рутину: обмер, реверс, проверки, развёртки, пакет производства.

Разделение труда

Кто	Что делает	Чем
Инженер	придумывает и рисует новую деталь, принимает решения по форме, радиусам, разгрузкам	FreeCAD — руками, привычно
Генератор кода	превращает нарисованное или реверснудое в код с параметрами; код открывается во FreeCAD как обычная деталь	recada.py → Python для FreeCAD
Инструмент	обмер, реверс, растяжение, операции, три критерия приёмки, DXF, BOM, пакет для Blechcon	headless-ядро на OCCT, веб-интерфейс
Редактор изделия	багажник как параметры: высота, положение, длина; ноги регенерируются	рабочее окно

Почему FreeCAD остаётся, а не уходит

Опыт показал: в цепочке автоматизации FreeCAD не нужен и даже мешает — его OCCT 7.8 не выполняет операции, которые проходят на 7.9 в нашем ядре. Но там, где нужна рука конструктора — новая форма, нестандартный узел, эскиз под конкретную машину — FreeCAD незаменим и бесплатен. Отсюда гибрид: FreeCAD рисует, инструмент считает и проверяет,

генератор кода связывает их в обе стороны.

Идея workbench: как связать

Два пути, проверены обсуждением. Первый — полноценный верстак FreeCAD на его Part-API: требует переноса кода с OCP на другой API и упирается в отличия версий OCCT (offset у нас падал именно там). Второй — гибридный верстак: кнопки в FreeCAD сохраняют выделенное тело во временный STEP, вызывают внешний инструмент из его окружения и импортируют результат обратно. Ни переноса, ни конфликта версий; тяжёлая геометрия считается там, где она работает. Рекомендован второй путь. Делать его стоит после того, как устанутся операции ядра — оборачивать движущуюся цель в интерфейс рано.

VDI (Kasm/Guacamole) как способ дать внешним исполнителям FreeCAD в браузере остаётся в резерве — для сценария с недоверенными подрядчиками из раздела о найме. Для доверенной команды достаточно WireGuard и локального FreeCAD с генератором кода.

15a. Инструмент реверса gescada.py — построен и проверен

За два дня сентября собран рабочий инструмент, который снимает деталь с чужой геометрии и превращает её в проверенный производственный файл. Всё headless, без FreeCAD в цепочке: ядро OpenCASCADE подключено как библиотека (OCP), FreeCAD остаётся только смотрелкой. Один файл gescada.py: командная строка и браузерный интерфейс.

Что умеет

Функция	Что делает	Проверено на
Обмер	толщина, гибы с двумя углами (поворот и двугранный), радиусы, отверстия с осями, разгрузки	Defender LRDE-2BR1: $t=3.0$, 7 гибов, 6 отверстий — повторяется до сотых
Расщепление на оболочки	виртуальный щуп: точка — нормаль $\times t$ попадает на поверхность $\rightarrow$ грань оболочечная; парование + двухцветная раскраска графа	41 грань покрывает 93 % площади; стороны 21/20
Реконструкция	кинематика на всех гранях тела, перестроение зоныгиба, заделка дыр	объём 78031.6 против эталонных 78031.6
Растяжение	разрез полупространством вдоль плоскости стенки, сдвиг, призма сечения; автоподбор места разреза по одиночному сечению	стенка +10 мм, +20 мм — замкнуто, годно
Операции	зеркало, сверление, заглушка, обрезка, скругления — с проверкой после каждой	все дают замкнутый солид
Развёртка	DXF с линиямигиба на отдельном слое	299 $\times$ 168 мм — совпало с порталом
Сборка	разбор STEP на детали с именами, группировка одинаковых, пакетный реверс	84.5 МБ, 628 объектов

Три критерия приёмки — главный вывод

Критериев оказалось не один и не два, а три, и третий не заменяется первыми. Это не теория: каждый найден через отказ.

Критерий	Чем проверяется	Что ловит	Как найден
Метрология	point-sampling двусторонний, расстояние до ПОВЕРХНОСТИ	точность геометрии	свой
Целостность	свободных рёбер = 0, солюдов ≥ 1	дыры, незамкнутость	отказ портала Blehcon
Производство	загрузка на портал поставщика	распознаётся ли как листовая деталь	опыт

Три ошибки, найденные и исправленные

1. Метрология мерилa расстояние до тела, а не до поверхности. distToShape до солида возвращает ноль для точек внутри материала — «толстая» деталь проходила приёмку. Проверка: сдвиг детали на 0.3 мм давал 74 % точек в допуске, после исправления 29.8 %.
2. Односторонняя выборка не видела лишний металл: кандидат длиннее эталона давал RMS 0 и 100 %. Невязка сделана двусторонней.
3. Проверки замкнутости не было вовсе. Деталь может быть геометрически точной и дырявой одновременно — метрология этого не ловит. Обнаружено отказом портала, теперь считается одной строкой и предсказывает отказ до отправки.

Что не получилось и почему

Наращивание оболочки целиком (offset всей сшитой оболочки) оставляет дыры и зависит от версии OCCT: на 7.9 работает, на 7.8 внутри FreeCAD падает. Заменено поэлементным наращиванием с булевым объединением — для одной грани offset корректен всегда.

Заплатки BRepFill в зонегиба дают сплайновую грань — распознаватель листового металла на такой ломается. Отсюда правило: в зонегиба строить только канонические поверхности (цилиндры и плоские секторы), профиль разгрузки генерировать по правилу, а не латать.

Параметрический поворот углагиба даёт замкнутое тело, но пока не проходит распознавание у поставщика: торцевой профильгиба с разгрузкой надо генерировать заново, а не копировать. Это единственная незакрытая задача цепочки — она понятна до деталей.

15б. Редактор изделия: багажник как параметр, а не как геометрия

Ключевая мысль, к которой пришли в работе: у багажника нет произвольных степеней свободы. У него есть продуктовые параметры, а положение и форма деталей — их следствия. Редактор поэтому не двигает детали, а регенерирует их.

Сценарий, ради которого всё делалось

Багажник спроектирован, между крышей и низом поперечины 20 мм — руку не просунуть. Решение: приподнять. Если ноги уже реверснуты в код, достаточно одного числа: точки крепления на крыше зафиксированы, вертикальная стенка каждой ноги растягивается на 20 мм, развёртки пересчитываются, DXF обновляются, три критерия приёмки прогоняются заново. Полный реверс всей системы не нужен.

Тот же цикл обслуживает аэродинамику: CFD говорит «сдвинуть платформу вперёд на 30, поднять на 10» — это два числа в product.json, а не неделя ручной работы. Именно поэтому гнутые детали обязаны жить как код с параметрами.

Единое рабочее окно

Зона	Содержимое
Дерево слева	таблица как BOM: видимость, выбор, имя, количество экземпляров, статус (исходник / реверснута / параметрическая), роль (нога, кронштейн крыши, платформа, поперечина, крепёж, кузов). Поиск по имени, автоопределение ролей по геометрии
Сцена	свой просмотрщик на three.js: разлёт, прозрачность, сечение, измерение, виды, изоляция. Выбранные подсвечены, реверснутые зелёные
Действия	для исходника — «Полный реверс» (одинаковые детали считаются один раз); для реверснутой — растяжение, отверстия, зеркало, DXF
Изделие	точки крепления к крыше как якорь, «поднять платформу на N мм» — регенерация всех ног
Журнал	project.json: каждая операция записана параметрами. Истина — журнал, геометрия — артефакт

Пакет производства

Одна кнопка собирает архив: step/ — уникальные детали, dxf/ — развёртки с линиямигиба, passport/ — обмер каждой в JSON, BOM.csv — спецификация с количествами, project.json — журнал операций. Это и есть то, что уходит в Blehcon.

Что это меняет в экономике проекта

Реверс кронштейна Defender занял минуты вместо дней. Четыре одинаковые ноги считаются один раз. Подъём платформы — одно число вместо перепроектирования. Инфраструктура: EX44 за 59 евро нетто плюс Storage Box — около 63 евро в месяц за систему, которой нет в коробочных CAD: автоматический реверс листа с проверкой производственной пригодности.

15в. Библиотека деталей и сервер: система с обратной связью

Сервер EX44 куплен, библиотека собственных STEP-файлов собирается. Вместе они превращают инструмент из демонстрации в систему, где каждая проверенная деталь делает следующую точнее.

Что даёт сервер

Разделение ядра и интерфейса: ядро — библиотека функций с командной строкой, интерфейс — тонкий слой над очередью задач. Реверс ставится в очередь, страница не блокируется, результаты сохраняются в постоянное хранилище по хешу файла. Без этого не заработают ни второй пользователь, ни библиотека.

Непрерывная регрессия: каждый коммит в инструмент прогоняется по библиотеке ночью на CI, утром — одна цифра: сколько деталей проходят три критерия. Ломать работающее незаметно больше нельзя.

Общий доступ: удалённые инженеры из раздела о найме работают через WireGuard с одним инструментом и одними правилами.

Что даёт библиотека

Применение	Как работает	Что закрывает
Калибровка К-фактора	наша аналитическая развёртка против ответа портала Blechcon по каждой детали (299 × 168 подтверждено)	третий критерий из ручной проверки становится источником данных
Каталог разгрузок	типы, глубины, привязка к кромке — снятые с реальных деталей	незакрытую задачу зоныгиба: генерировать по правилу, не латать
DFM-правила	статистика радиусов, углов, толщин, диаметров, отступов от кромки	dfm_blechcon.json из практики, а не из головы
Поиск похожего	подпись детали: t, число гибов, набор углов, рисунок отверстий	взять проверенную и растянуть вместо проектирования с нуля
Паспорта авто	точки крепления и профили крыш как данные библиотеки	редактор изделия без ручного ввода координат
Стандарт школы	новый конструктор видит принятые радиусы и решения	передачу опыта без устных преданий

Граница честности: библиотека советует и предупреждает, решает человек. Она не скажет, выдержит ли деталь нагрузку, и не заменит инженерное решение там, где новая машина требует того, чего в практике ещё не было.

Рынок: Zoo как ориентир

Zoo (zoo.dev, бывший KittyCAD) — ближайший по философии проект: их язык KCL — читаемый текст как источник истины, версионирование в Git, агент Zookeeper переписывает STEP в код. Два отличия делают нашу нишу свободной: геометрический движок Zoo облачный и американский — 3D-вид это видеопоток с их серверов, чертежи уходят к ним; и у них нет производственной приёмки листового металла — метрологии, целостности, распознавания порталом поставщика. Zoo подтверждает направление и не закрывает нашу задачу.

Как Zoo стримит и что из этого следует

Движок Zoo работает на их серверах. Клиент ничего не считает: команды моделирования уходят по WebSocket, обратно приходят видеокадры по WebRTC — как видеозвонок. Стримится только 3D-вьюпорт; интерфейс, дерево и редактор кода живут в клиенте. Это не Kasm: Kasm стримит целый рабочий стол или приложение через захват экрана, тяжело и с задержкой; Zoo встроили рендер и кодек прямо в собственный движок на Rust, поэтому клиент лёгкий. Три причины их выбора: не портировать движок под платформы, открывать любые модели на слабых машинах, и главное — геометрия никогда не покидает их инфраструктуру, клиент видит только пиксели.

Для нас это независимое подтверждение принципа из раздела о VDI — «пиксели, не геометрия». Разница в реализации: они встроили стриминг в свой движок, мы стримили бы готовое приложение. Обратная сторона нашей текущей схемы: просмотрщик на three.js отдаёт в браузер триангулированную сетку — для доверенной команды через WireGuard это нормально, для внешних подрядчиков это утечка, сетку можно сохранить. Поэтому для недоверенных остаётся стриминг пикселей.

Свой движок: ядро — нет, обвязка — да

«Движок» Zoo — три слоя: геометрическое ядро (B-Rep, булевы, скругления, развёртки), рендер и стриминг с API. Ядро они пишут годами командой специалистов по геометрическим ядрам с десятками миллионов инвестиций — и в марте 2026 всё ещё писали, что скругления рёбер остаются их болью. Это цена ядра. Нам его писать не нужно: OpenCASCADE — тридцать лет

работы, бесплатно и открыто, и на нём вчера реверснута деталь, которую принял портал. Ядро — решённая задача чужими руками.

Что собрать реально можно — два верхних слоя вокруг OCCT. Рендер на сервере: наш three.js-просмотрщик в headless-браузере, либо встроенная визуализация OCCT. Стриминг: картинка по WebRTC в клиент, команды камеры обратно — готовые библиотеки, не исследование, порядок работы недели. Это «стриминг выюпорта вокруг OCCT», не «свой движок».

Когда это нужно: только для внешних исполнителей, которым нельзя отдавать геометрию. Для своей команды нынешняя схема проще и быстрее. Стриминг выюпорта — в резерве рядом с VDI, делается при появлении первого недоверенного подрядчика. Zoo пришлось писать ядро, потому что они продают платформу. Мы продаём багажники — разная экономика, разные решения.

Ядро напрямую: OpenCASCADE без FreeCAD

Точная формулировка архитектуры: OpenCASCADE и есть ядро внутри FreeCAD. Мы вызываем его напрямую через обёртку OCP, минуя FreeCAD — двигатель на стенде вместо автомобиля. Это даёт headless-работу на сервере и в CI, пакетную обработку библиотеки и свою версию ядра (7.9, где наращивание работает; в FreeCAD 7.8 оно падает). FreeCAD остаётся кабиной для инженера — там, где нужна рука. Одна геометрия, два способа обращения: программный для автоматки, ручной для человека. Практика: держать FreeCAD той сборки, где версия OCCT совпадает с ядром.

Ядро создано с ИИ, проверено реальностью, работает без ИИ. ИИ писал код ядра, но не работает внутри него: каждая функция — обычный детерминированный Python, один вход даёт один выход. Три ошибки ядра нашёл не ИИ — их нашли перепроверка, негативный тест и отказ портала. Отсюда правило разработки: тест раньше кода (Spec-Driven Development, применённый к самому инструменту), библиотека как регрессия после. Обучать свою модель не нужно и не выйдет — десятки деталей не выборка; библиотека работает как справочник. Готовый ИИ подключается как переводчик намерений к операциям ядра, не как источник геометрии.

Просмотрщики на том же ядре (состояние на сентябрь 2026)

Инструмент	Что это	Где применить
OCP.wasm + Yet Another CAD Viewer	OpenCascade и обёртка OCP скомпилированы в WebAssembly через Pyodide; build123d работает целиком в браузере. Та же OCP, что в rescada.py	инструмент у клиента в браузере без сервера — ничего не покидает машину; ответ на утечку сетки для внешних подрядчиков
OpenCascade.js (ocjs.org)	порт OCCT в JavaScript/WASM через Emscripten, почти нативная скорость, многопоточность, урезанные сборки; на нём CascadeStudio	браузерный просмотр и лёгкие операции без утечки B-Rep
OCCT WebGL viewer	собственная визуализация OCCT в WASM — открывает BREP в браузере, нужен WebGL 2.0	показать «ровно как в ядре» без FreeCAD
Mayo	настольный просмотрщик и конвертер на Qt + OCCT: STEP, IGES, BREP, экспорт glTF; обновляется	бесплатный десктопный STEP-вьювер на нашем ядре — проверить, что видит ядро
OCP CAD Viewer (VS Code)	показывает объекты OCP/build123d прямо из Python, без STEP	отладка ядра при разработке
Наш three.js-просмотрщик	сетка с сервера, выбор, разлёт, сечение, измерение	быстрый интерфейс для доверенной команды

Стратегически интереснее всего OCP.wasm: наша обёртка та же, значит rescada.py может работать у клиента в браузере без сервера вообще — обратный подход Zoo, где всё улетает в облако. Для внешних исполнителей это третий путь наряду с VDI и стримингом выюпорта: считают у себя, отправляют только результат приёмки.

Версии ядра и формат на границах

OCCT 7.8 в FreeCAD 1.1, 7.9.3 в нашем ядре, 8.0 вышла в мае 2026 (крупнейший шаг за годы: чтение STEP до 75 % быстрее, потокобезопасное чтение и запись STEP, графовая топология BRepGraph, ускоренные экстремумы — всё под сервер и библиотеку; новых операций для листового металла нет). FreeCAD на восьмёрке — реалистично 2027 год. Правило: ядро инструмента фиксируется на одной версии, записывается в project.json, и переезжает только целиком — после прогона библиотеки-регрессии до и после. Ядро и FreeCAD никогда не обязаны совпадать; архитектура это переживает, потому что генератор кода вшивает готовые тела, а не пересчитывает их во FreeCAD.

Формат на границах — всегда STEP. BREP — внутренний формат ядра, его версия меняется с мажорным релизом, и 7.9 может не прочитать то, что записала 8. STEP — ISO 10303, читается любой версией в обе стороны, Inventor, SolidWorks, порталом поставщика. Правило в одну строку: BREP — внутри процесса, STEP — на любой границе: между инструментом и FreeCAD, между сервером и подрядчиком, между сегодняшним ядром и завтрашним. Цена — объём (800 КБ против 120 у BREP) — терпима.

STEP с именами: обязательное требование к экспорту

STEP хранит имена деталей и узлов, дерево сборки с положениями, количество экземпляров, цвета и слои — если писать через XCAF (STEPCAFControl_Writer с документом). На входе инструмент так и читает: имена Bracket_F_v2.1, wind_side_v2.1 приходят из сборки с положениями. На выходе сейчас пишет упрощённо (STEPControl_Writer) и имена теряет — дерево сплющивается в безымянный компаунд. Это ошибка инструмента, не формата; исправляется заменой писателя: имя, положение и цвет для каждой детали. Цветом кодируется статус: зелёный — реверснута.

STEP переносит	STEP не переносит — едет в project.json
имена деталей и узлов	обмер: толщина, гибы, отверстия
дерево сборки с положениями	статус реверса, роль
количество экземпляров	журнал операций
цвета и слои	точки крепления

Пара «STEP + project.json» — не избыточность, а разделение: STEP несёт то, что понимают все, JSON — то, что понимаем только мы; связь по имени детали. Безымянные экземпляры вида =>[0:1:1:5] в сборке — не потеря при чтении, а незазванные компоненты в исходном CAD; лечится именованием перед экспортом из Inventor.

Решение: каскадный вьювер на сервере, наружу только пиксели

Принято после появления EX44. Ядро и рендер OCCT работают на сервере; визуализация OCCT (V3d, AIS) доступна из Python через ту же OCP — без C++ и без WASM. Браузер получает кадры и отправляет клики; сервер сам определяет, на какую грань, ребро или вершину пришёлся клик — выбор точный по B-Rep, с привязкой к центрам отверстий и серединам рёбер. Геометрия не покидает сервер: ни сетка, ни STEP. Это модель Zoo на OCCT и раздел о VDI без Kasm.

Отвергнутая альтернатива — гибрид с локальным вращением по сетке: быстрее и дешевле для сервера, но сетка уходит в браузер и может быть сохранена. Для защиты данных неприемлемо.

Достаточно ли EX44

Видеокарты нет — рендер программный, через Mesa на процессоре. Сцена CAD проста: сотни тысяч треугольников, десятки кадров в секунду на ядро. Плюс кодирование кадра — ещё ядро. Итого два потока на активную сессию; активная — только пока человек вращает, при просмотре нагрузка нулевая. За вычетом обмера и инфраструктуры — пять-шесть одновременно вращающих. Для команды с запасом, для внешних подрядчиков — несколько человек одновременно.

Что расширяет запас без железа: во время вращения кадр пониженного разрешения, после остановки — один чёткий; лимит частоты кадров на сессию. Когда понадобится другое железо: при десяти и более одновременно активных — GEX-серверы Hetzner с GPU, цена в три-четыре раза выше; решение на потом.

Защита данных — не только стриминг

Мера	Что закрывает
Все библиотеки (three.js, рако и др.) на своём сервере	сейчас просмотрщик грузит их с внешних CDN — факт открытия детали виден третьей стороне по запросам
Доступ только через WireGuard, свой ключ у каждого	в логах видно, кто что открывал и когда
Без точек скачивания для внешних ролей	экспорт STEP и DXF — только доверенным
Водяной знак с именем сессии на кадре	снимок экрана запретить нельзя, атрибутировать — можно
Рендер по запросу, не поток	нагрузка на сервер и объём трафика

Граница, признанная заранее: от фотографии экрана не защищает ничто. Пиксели закрывают утечку системы — моделей целиком, параметров, библиотеки. Одну деталь перерисовать с экрана можно всегда: «перенабрать деталь можно, систему нельзя».

Этапность: сначала статичный рендер по запросу — кадр с заданной камерой и номер грани по клику; непрерывный поток — позже, если понадобится. Место в очереди: после разделения ядра и интерфейса и очереди задач; строить точный выювер к инструменту, который меняется по три раза в день, рано.

15г. Инструкция по монтажу как артефакт изделия

Разобрана действующая инструкция Airholder для Defender 110 (Montageanleitung, 15 страниц). Вывод: около двух третей содержимого — прямые следствия product.json и BOM, треть — постоянные правила и юрисдика. Инструкция становится седьмым артефактом пакета производства рядом с STEP, DXF, паспортами, BOM, чертежами и project.json — с адресатом покупатель, а не Blechcon.

Что в инструкции откуда берётся

Страница / блок	Источник	Режим
Спецификация Komplettsset: 16 позиций с количествами (S13A x6, B13A x14, M8x14 DIN 912 x56, Halterung 1/2 x8+8...)	BOM; количество винтов — из числа соединений	авто
Пиктограммы деталей, виды сверху и изометрия, разнесённый вид	HLR-проекции с сервера в штриховом стиле	авто
Позиции сухарей в пазах: 14, 54, 44, 344, 15, 815 мм по профилям A/B/C/D	вычисляются из положений поперечин и кронштейнов вдоль профиля	авто
Масса багажника 48 кг в предупреждении о нагрузке	BOM с плотностями	авто
Шаги 1-13: соединение половин профиля D, рама, уголки, кронштейны, установка на крышу; выноски крепежа	порядок из графа связей; текст из шаблонов по типу соединения	шаблон + числа
Юрисдика, предупреждения, правило ориентации В-профиля, сборка на ровной поверхности, «правильно / неправильно» 10.1 и 10.2, два способа вставки сухаря	постоянные блоки — конструкторские знания, хранятся как правила изделия	ручной

Находка для модели изделия: «Completed connector» = Halterung 1 + Halterung 2. Нога состоит из двух гнутых деталей — кронштейн крыши и стойка — плюс резиновая подкладка и винт M6x22 в водосток. В редакторе изделия нога — узел из двух деталей с общим интерфейсом; подъём платформы растягивает только стойку, кронштейн крыши не трогает. Это подтверждает механику точек фиксации, реализованную в инструменте.

Инструменты

Задача	Инструмент	Статус
Штриховые виды как в инструкции	HLR из OCCT через OCP — проекции с видимыми и скрытыми линиями, вектор	ядро есть, модуль не задействован
Растр с тенями при необходимости	визуализация OCCT headless / three.js в безголовом браузере	резерв
Вектор в PDF	reportlab (собирает этот документ) + svgwrite	есть
Граф связей, порядок шагов	networkx + контакты деталей через BRepExtrema	есть
Шаблоны текста, DE/EN	Jinja2 + словари	добавить
Штрих-код EAN	python-barcode	добавить
Каталог крепежа DIN	своя таблица	добавить

Ключевой выбор — HLR вместо раstra: инструкция сделана в штриховом стиле технической иллюстрации, HLR даёт ровно это в векторе для печати и считается на процессоре без графики.

Что добавить в систему — четыре слоя

1. Граф связей: какая деталь касается какой — из геометрии; из него порядок монтажа снизу вверх. 2. Модель соединений в product.json: пара деталей → крепёж, количество, позиция вдоль профиля, момент, фиксатор резьбы; из неё считаются 56 винтов, позиции сухарей и выноски — самый содержательный кусок, он же нужен для проверок зазоров и коллизий. 3. Серверный рендер по шаблонам видов: сверху, изометрия, разнесённый, шаг с подсветкой. 4. Генератор документа: шаблон страницы с рамкой, статичные блоки, подстановка данных, два языка.

Сервер: HLR-проекция сборки — секунды на ядро; полная инструкция около полусотни картинок — минута-две; память — сотни мегабайт; GPU не нужен. Инструкция пересобирается на CI при каждом изменении изделия, как DXF. Что даёт сверх ручной работы: изменили число поперечин — пересчитались позиции сухарей, количества винтов, масса; Ranger получает инструкцию в день готовности геометрии; несоответствий между спецификацией и схемами не бывает по построению.

15д. Два мира: B-Rep и сетка

Уточнение по практике: автомобиль в работе — не STEP, а FBX от сторонних моделеров, часто с неверным масштабом и пропорциями. Сейчас багажник ставится на машину в Blender: STEP багажника конвертируется в GLB, масштаб машины подгоняется вручную. Система делится на два мира с разной точностью, и смешивать их нельзя.

	Мир B-Rep	Мир сетки
Объект	багажник, детали, крепёж	автомобиль, окружение
Формат	STEP (на границах), BREP (внутри)	FBX на входе, GLB на границе
Точность	производственная: 0.05 мм, три критерия приёмки	визуальная: сантиметры, калибруется
Назначение	производство, реверс, параметрика	картинка, примерка, грубые зазоры, конфигуратор
Инструмент	recada.py на OCCT	Blender (скриптуемый, MCP уже есть)

Следствия

Точки крепления нельзя брать с модели машины — она неточная. Источник — собственные кронштейны, проверенные на реальной крыше: у Defender геометрия Halterung 1 и есть паспорт точек, снятый с металла. Логика разворачивается: не «машина задаёт багажник», а «багажник, который уже стоит, задаёт координаты машины». FBX подкладывается под паспорт для визуальной проверки.

Масштаб FBX калибруется по заводским размерам — колёсная база, ширина, высота крыши. Один коэффициент записывается в паспорт автомобиля вместе с моделью и переиспользуется вместо подгонки на глаз при каждой примерке.

Конвертация STEP → GLB без Blender: у OCCT есть собственный писатель glTF (RWGlTF_CafWriter, доступен из OCP), сохраняет имена деталей через XCAF. GLB багажника получается из инструмента headless на сервере, со структурой и именами.

Blender остаётся для того, что OCCT не умеет: чтение FBX, фотореалистичные рендеры для сайта, картинка машины в инструкции. Он скриптуем — примерка «взять GLB багажника, подставить откалиброванный FBX, отрендерить» автоматизируется через уже имеющийся Blender MCP.

Граница форматов: STEP — внутри B-Rep-мира и на границе с производством; GLB — на границе с визуализацией и конфигуратором Unity. Защита данных: сторонние FBX-модели машин часто лицензированы на одного пользователя и запрещают распространение — на сервере они лежат в той же защищённой зоне, что чертежи, наружу в конфигуратор уходят только рендеры или упрощённые сетки.

15е. Данные: источники, каталоги, единая структура

По практике источников оказалось шесть, и им нужно одно место. Модель данных: два каталога — автомобили и аксессуары — с единой структурой «объект → представления с классом точности». Собственные детали в той же структуре: STEP, чертёж, ответ портала, паспорт обмера. Одна библиотека на всё.

Источники по убыванию точности и доверия

Источник	Что даёт	Ограничение
Aufbaurichtlinien производителя (VW Aufbaurichtlinien, Ford Body and Equipment Mounting Manual, Stellantis Conversion Guidelines)	что с кузовом разрешено делать: нагрузка на крышу статическая и динамическая, несущая структура (В-стойки, дуги крыши), зоны крепления с координатами, запретные зоны (подушки, датчики, проводка), центр тяжести, моменты и классы крепежа, антикоррозионные требования, точки электрики	доступ через порталы для Aufbauhersteller после регистрации; версионизируются по модельным годам
CAD от производителя (VW, Ford, Stellantis)	точная геометрия кузова, штатные точки, заводская система координат	NDA, лицензия; формат JT/CATIA требует конвертации (Inventor открывает JT) — один раз в STEP
2D-чертежи производителя	номинальные размеры и допуски штатных точек — что гарантируется для всех машин; единственная официальная геометрия для старых (Defender)	DXF читается ezdxf; PDF — вручную, чисел десятков
STL-скан	реальная машина или аксессуар как есть: допуски производства, накладки, модификации	регистрация в общую систему координат, чистка шума и дыр
Кронштейны в металле	подтверждённые точки крепления	только там, где уже стоим
CAD аксессуаров от поставщика	STEP, масса, интерфейс крепления	не все дают
FBX	картинка, конфигуратор	масштаб условный, калибруется по заводским размерам

Aufbaurichtlinien выше OEM-CAD по одной причине: CAD показывает геометрию, а Richtlinien — что с ней разрешено делать. Половина правил валидатора уровня изделия получает официальный источник с номером страницы вместо нашей оценки. Ссылка на Richtlinien в документации изделия — позиция в споре о гарантии и в сертификации: «кронштейн стоит в зоне, разрешённой производителем, нагрузка в пределах указанной». Для покупателя — сохранение заводской гарантии на кузов; ISO 11154 плюс соответствие Richtlinien — комплект, который дилер примет. Извлечение: готовый ИИ вытаскивает разделы о крыше, стойках, нагрузках и зонах в JSON с указанием страницы, инженер проверяет числа; каждое правило паспорта хранит документ, версию, страницу.

Единая структура: объект → представления

Представлен ие	Автомобиль	Аксессуар	Своя деталь	Роль
CAD	OEM	STEP поставщика	STEP из реверса или FreeCAD	номинал
2D-чертёж	заводской	схема отверстий	чертёж из HLR	номинал с допусками
Скан	реальная крыша	реальный тент, канистра	—	реальность

Представление	Автомобиль	Аксессуар	Своя деталь	Роль
Визуальная модель	FBX	GLB	GLB из OCCT	картинка
Подтверждение	кронштейны в металле	—	ответ портала, паспорт обмера	факт

Не у каждого объекта есть все представления — у старого Defender нет OEM-CAD, у чужого тента нет STEP. Система работает с тем, что есть, и знает класс точности каждого источника.

Общая система координат — заводская

OEM-файлы приходят в стандартной системе автомобиля: X вдоль машины, ноль по производителю. Это и есть общая система, которой не хватало: скан выравнивается по ней (ICP, Open3D), FBX масштабируется по ней, паспорт записывается в ней. Там, где OEM-CAD нет, систему задаёт скан. Один раз выровняли — все проверки в одном пространстве.

Что открывают сканы — четвёртый критерий

Проверка посадки: грань кронштейна, которая ложится на крышу, сравнивается со сканом той же метрологией — точки грани → расстояние до сетки. Карта прилегания: где лежит, где висит, где упирается. Это критерий монтажный, не производственный; ни Blechcon, ни портал его не дают. Зазоры в реальности: поперечина к крыше, нога к рейлингу, платформа к антенне — от B-Rer до скана, без FBX. Сценарий «двадцать миллиметров, руку не просунуть» проверяется на настоящей крыше.

Скан против OEM-CAD — сама по себе информация: разбег у машин одной серии показывает, сколько регулировки должен иметь кронштейн. Продольные пазы Halterung 2 — ровно об этом.

Граница: реверс из скана в B-Rer — задача другого порядка, чем из STEP; для простого кронштейна реально, для сложной отливки нет. Скан аксессуара — источник размеров и проверок, не исходник для производства; адаптер под чужой аксессуар проектируется в FreeCAD по числам со скана.

Опция: реверс из STL

Статус — опция, не план. Отличается от реверса из STEP принципиально: в STEP плоскости и цилиндры уже заданы, в STL только треугольники — плоскость надо найти и подобрать, цилиндр гибок распознать по кривизне, отверстие восстановить по границе, каждый шаг с погрешностью скана.

Для листового металла реально: две поверхности — плоскости и цилиндры — лучший случай для распознавания (сегментация по нормальям, RANSAC, подбор цилиндра). Получаются те же числа, что даёт обмер: толщина по расстоянию между параллельными плоскостями, радиусы, углы, отверстия, контур. Ключевое решение: реверсировать не в B-Rer, а в параметры, а геометрию строить заново генератором — сшивать подобранные поверхности в тело не нужно, тело строит генератор, который уже проходит три критерия. Совпадает с принципом «истина — параметры».

Ограничения: качество скана (структурированный свет 0.05-0.1 мм, бытовые хуже; кромки скругляются, отверстия обрастают); лист снимать с двух сторон, иначе толщина — предположение; литьё, вытяжка, свободные поверхности — вне метода, там NURBS уровня Geomagic. Инструменты: Open3D, pyransac3d, scipy, далее наш генератор — всё открытое.

Где нужно: чужие детали без CAD; детали клиента под его крепления; и главное — входной контроль: скан детали от Blechcon против нашего STEP той же метрологией. Реверс наоборот — не восстанавливаем, а проверяем. Пятый критерий: приёмка поставки.

Аксессуары: вторая ось с данными

Интерфейс крепления описывается один раз для платформы (шаг пазов, сечение профиля) и один раз для аксессуара (в Т-паз, на airline-рейку, на кронштейн, крепёж). Дальше автоматически: аксессуар в конфигураторе показывается только там, где физически встанет; масса добавляется к нагрузке на крышу (нагрузка производителя минус багажник минус аксессуары); габарит проверяется на коллизии с кронштейнами и дефлектором; попадает в инструкцию отдельным шагом; тент на переднем краю — отдельный прогон CFD.

Инструменты для сеток: OCCT читает STL (RWStl); для тяжёлых сканов — trimesh для расстояний точка-сетка, Open3D для регистрации и чистки. Всё на процессоре; память под скан в 300 МБ — несколько гигабайт на время обработки, EX44 достаточно.

Защита: OEM-файлы под NDA — самое чувствительное на сервере; их утечка — нарушение договора с производителем. Пиксели наружу, личные ключи, запрет скачивания для внешних — именно для них. OEM-геометрия никогда не уходит в конфигуратор и рендеры — там только багажники и FBX.

15ж. Конкуренты как источник данных

Конкуренты публикуют фото, PDF инструкций, размеры и массу. Всё это можно использовать — легально, пока анализируется, а не копируется геометрия. Конкурент — тот же объект библиотеки с представлениями низкой точности: инструкция как документ, извлечённая спецификация, габариты, масса, фото.

Что	Как	Что даёт
Структурный бенчмарк	из PDF инструкций: число деталей, крепёжных позиций, шагов, время монтажа, тип ног (одна или две детали), решение углов, задействованные точки крыши	таблица по конкурентам на одну машину: где проще, где сложнее
Подсказки для паспорта	инструкция показывает, куда конкурент крепится: водосток, рейлинг, штатные резьбы	подтверждение точек там, где OEM-данных нет
Метрики эффективности	масса на м ² платформы, высота над крышей, масса на точку крепления — в тех же единицах, что считает наша система из BOM	аргумент в карточку товара и цель для конструктора (55 мм против 70 у Front Runner)
Фото	фотограмметрия — грубая сетка	только габариты, пропорции, обтекаемость; не для реверса
Извлечение из PDF	готовый ИИ: PDF на входе, структурированный JSON на выходе, проверка глазами	спецификации конкурентов в базе, сравнения автоматически
Уроки DFM	как решают разгрузки, углы, стыки профилей	смотреть и учиться, не повторяя
Патентный поиск	по механизмам крепления на крышу до проектирования	недорогая страховка от претензии

Граница: публичные документы анализировать можно; воспроизводить геометрию, отличительные формы и узлы под патентом или зарегистрированным промышленным образцом — нет. Ценность — не повторить их багажник, а вывести свой быстрее и точнее.

15з. Проверки уровня изделия: размещение, доступность, высота, настройка

Уровень изделия — не геометрия детали, а багажник на конкретной машине. Каждый вопрос «куда можно ставить», «достанет ли человек», «влезет ли в паркинг» превращается в правило валидатора: число, источник данных, порог. Каждая настройка — параметр product.json, каждый параметр тянет проверки заново.

Куда можно ставить

В паспорте машины — зоны. Разрешённые: водосток, рейлинги, штатные резьбы, с допустимой нагрузкой на точку от производителя. Запрещённые: люк, антенна, плавник, датчики систем помощи водителю, камера, стоп-сигнал, зона качания задней двери. Положение вдоль крыши проверяется против зон автоматически: сдвинули вперёд — валидатор сообщает, что передняя нога зашла в зону датчика дождя. Источники: OEM-CAD и чертежи для зон, скан для реальной машины, инструкции конкурентов как подтверждение точек.

Правила валидатора уровня изделия

Проверка	Что считается	Порог / источник
Зоны крепления	ноги и кронштейны внутри разрешённых зон, вне запрещённых	паспорт машины (OEM, чертежи, скан)
Нагрузка на крышу	производитель — масса багажника — аксессуаров; —50 % на бездорожье	заводская допустимая нагрузка; из инструкции Airholder
Нагрузка на точку	распределение массы по точкам крепления	допустимое на точку от производителя
Двери и задняя дверь	дуга открывания против ног и заднего свеса платформы	кинематика двери из OEM или замер; полное открывание обязательно
Высота для паркинга	высота машины + багажник + самый высокий аксессуар	1.85 / 1.90 / 2.00 / 2.10 м; показывать в конфигураторе для каждой конфигурации
Загрузка с земли	высота нижней кромки платформы от земли	антропометрия DIN 33402; при превышении — ступенька из аксессуаров
Дотягиваемость	до центра платформы сбоку по ширине и высоте	DIN 33402
Зазор до крыши	низ поперечины ↔ крыша, нога ↔ рейлинг, платформа ↔ антенна	B-Rep ↔ скан или OEM; сценарий «20 мм, руку не просунуть»
Видимость	обзор через заднее стекло, камера заднего вида, антенна	луч обзора из OEM-положения зеркала
Аэродинамика	дефлектор, шумовые кромки, частоты срыва по Струхалю на поперечинах	формулы в валидаторе; CFD — разово
Центр тяжести	высота ЦТ машины с нагрузкой на крыше и аксессуарами	предел из Aufbaurichtlinien; для высокого фургона с палаткой — ограничивающий фактор
Динамика ISO 11154	город, экстренное торможение, боковой удар — расчётно	до испытаний в лаборатории
Совместимость аксессуаров	интерфейс, положение, масса, коллизии с кронштейнами и дефлектором	каталог аксессуаров

Каждое правило хранит источник со ссылкой — документ, версия, страница. Для зон крепления, нагрузки на крышу, нагрузки на точку, центра тяжести и крепежа источник — Aufbaurichtlinien производителя; для зазоров и посадки — скан и OEM-CAD; для доступности — DIN 33402; для динамики — ISO 11154. В конфигураторе покупателю показывается: «соответствует требованиям производителя к надстройкам».

Что регулируется без перепроектирования

Положение багажника вдоль крыши в пределах разрешённых зон; высота над крышей; шаг и число поперечин под груз; положение аксессуаров с проверкой совместимости; наличие и ориентация дефлектора. Всё это параметры `product.json` — меняются числом, ноги и кронштейны регенерируются, проверки прогоняются заново, инструкция и DXF пересобираются.

Для покупателя в конфигураторе: полная высота с выбранными аксессуарами и вердикт по паркингу — до покупки, а не в паркинге. Это продолжение того, что уже есть в карточке Т6 (2045 мм), только для каждой конфигурации автоматически.

15и. Дизайн продукта: что даёт система

Всё предыдущее — про то, как деталь попадает в производство. Этот раздел — про то, каким должен быть сам багажник, и где система даёт конструктору не удобство, а новые решения. Три вещи опираются на данные, которые уже собираются: общность деталей между машинами, диапазон регулировки из разброса сканов, время монтажа из графа связей. Остальное — конструкторские правила, каждое кладётся в валидатор одной строкой.

Для покупателя

Время монтажа как проектный показатель. Сейчас 2–3 часа. Каждый шаг инструкции — минуты; сумма считается по графу связей. Система показывает, как предсобранные узлы её сокращают: нога в сборе с завода (Halterung 1 + 2 + подкладка, четыре винта) вместо двух деталей у клиента. Цель — час. Каждое изменение конструкции сразу видно во времени монтажа, а не после первой жалобы.

Один инструмент на всю сборку. Сейчас M8 и M6 — два ключа. Весь крепёж под один размер: инструкция короче, ошибок меньше, в коробку кладётся один ключ. Правило валидатора: число различных размеров крепежа в изделии — целевое значение 1, допустимое 2.

Сценарии груза. Палатка, велосипеды, каяк, канистры, ящики — у каждого своё требование к шагу поперечин, точкам крепления и распределению массы. Покупатель выбирает «что вожу», конфигуратор предлагает число поперечин, их позиции и аксессуары; валидатор проверяет нагрузку и высоту для паркинга с этим грузом. Сценарий груза — часть product.json.

Высота и паркинг — уже в разделе 15з. Добавляется: показывать покупателю в конфигураторе полную высоту с выбранным грузом и аксессуарами, не только с пустым багажником.

Для конструктора

Семейство ног вместо ног под каждую машину — самое сильное, что даёт библиотека. Анализ общности деталей между машинами: если стойка Halterung 2 с регулировкой пазом покрывает и Defender, и Ranger, а различается только кронштейн крыши Halterung 1 — это в разы меньше артикулов, оснастки у Blechcon и складских остатков. Система считает общность автоматически, когда есть паспорта нескольких машин: для каждой детали — на скольких машинах она применима без изменений, с растяжением, с другим кронштейном. Целевой показатель: доля общих деталей в новом изделии.

Диапазон регулировки из разброса. Скан против OEM-CAD даёт, на сколько реальные машины отличаются от чертежа: допуски кузова, накладки, просадка. Длина паза в стойке и запас по высоте кронштейна должны покрывать этот разброс с коэффициентом — число, а не интуиция. Чем больше сканов одной модели, тем точнее диапазон. Правило: регулировка $\geq 2 \times$ измеренный разброс.

Прочность и масса вместе. Планируемый CalculiX закрывает перебор толщины и формы ноги под нагрузку: где можно 2.5 вместо 3.0 мм, где нужны рёбра или отбортовка, где отверстия ослабляют. Масса на квадратный метр платформы — целевой показатель против конкурентов; модальный анализ — против дребезга на поперечинах.

Общая высота профиля как конкурентное поле: 55 мм у Airholder на T6 против 70 у Front Runner. Держать ниже конкурента — правило валидатора для каждой новой машины.

Для эксплуатации

Гальваническая пара. Нержавейка 1.4301 на алюминии в мокрой среде с солью — коррозия на стыке через сезон. Резиновые подкладки Gummiunterlage у вас есть; правило валидатора: между разнородными металлами всегда изолятор, и он обязан присутствовать в BOM на каждом контакте. Проверяется по графу связей: контакт сталь-алюминий без изолятора — ошибка.

Расходники и запчасти. Подкладки, заглушки, крепёж изнашиваются и теряются. BOM с именами и номерами позиций из инструкции делает возможным заказ отдельной детали по

номеру — сервисная выручка, которой сейчас нет, и удержание клиента. Каждая позиция BOM — потенциальный артикул в Shopify.

Защита от кражи — гайки с секретом на кронштейнах крыши как аксессуар: спрашивают, стоит копейки, повышает средний чек.

Обслуживание после бездорожья: инструкция содержит проверку затяжки; система может выдавать карту контрольных точек — какие винты проверить и с каким моментом — из той же модели соединений.

Для бренда и прослеживаемости

Серийный номер и QR-код на изделии: ведёт на инструкцию именно этой конфигурации, регистрацию гарантии, заказ запчастей. Прослеживаемость по ISO 9001 из коробки: серийник → product.json → партия у Blechson → ответ портала. Отзыв партии при дефекте — по базе, а не по памяти.

Фирменные элементы как параметрика: логотип уже вырезается лазером — деталь U5-Logo в сборке. Логотип, форма углов, рисунок дефлектора ведутся в той же системе и регенерируются под размер изделия, сохраняя узнаваемость.

Разборность и переработка: алюминий и нержавейка разделяются без инструмента — для немецкого рынка заявляемое преимущество; система может считать долю материалов по BOM и подтверждать разделяемость по графу связей (нет клеёных и неразъёмных соединений разнородных металлов).

Что из этого системное

Решение	На чём основано	Показатель
Семейство ног	паспорта нескольких машин, библиотека	доля общих деталей в новом изделии
Диапазон регулировки	скан против OEM, разброс по машинам	регулировка ≥ 2 × разброс
Время монтажа	граф связей, минуты на шаг	цель 1 час; предсборка узлов
Один инструмент	BOM	размеров крепежа: 1, допустимо 2
Гальваническая изоляция	граф связей + материалы	контактов сталь-алюминий без изолятора: 0
Масса и прочность	BOM + CalculiX	кг/м² ниже конкурента; запас по ISO 11154
Высота профиля	геометрия	ниже конкурента на той же машине
Прослеживаемость	серийник → product.json → партия → портал	отзыв по базе

Общий принцип: каждое дизайнерское решение, которое можно выразить числом, становится правилом валидатора и целевым показателем. Тогда следующая машина проектируется не «как получится», а против измеримых целей, и отклонение видно до производства.

15к. Обратная связь из поля: рекламации, опыт покупателей, соцсети

До сих пор обратная связь шла от портала и от испытаний. Этот раздел — про сторону после продажи: от дороги и людей. Три источника, у каждого своя механика; все они — ещё два представления в библиотеке у изделия и у машины: «полевые данные». Цикл тот же, что с порталом: поле → библиотека → правило → валидатор → следующая ревизия product.json.

Рекламации — как ответы портала, только про эксплуатацию

Каждая жалоба — структурированная запись: машина, конфигурация по серийному номеру, деталь, вид отказа (ослаб винт, коррозия на стыке, гул на скорости, не встало на крышу), фото. Серийник ведёт к product.json, к партии у Blechcon, к ответу портала. Отсюда: частота отказов по детали и по машине; корневая причина по цепочке — конструкция, партия или монтаж клиентом; правило в валидатор: три жалобы на ослабление одного винта — в инструкцию момент затяжки и фиксатор, в модель соединений — требование. Ровно как отказ портала стал критерием приёмки. Это САРА-цикл ISO 9001 с данными вместо папки; стоимость отказа по видам определяет, что чинить первым.

Опыт покупателей — прямо из инструкции

QR-код на каждом шаге: «шаг непонятен», «заняло дольше», «деталь не подошла». Время монтажа, ставшее проектным показателем в 15и, измеряется реальными людьми, а не оценкой по графу. Шаг, на котором спотыкаются все, переделывается: предсборка узла или другая картинка.

Соцсети — то, о чём не пишут в жалобах

Что показывают	Что это значит	Куда идёт
Самодельные крепления канистр, фонарей, лопат	спрос на аксессуары, которых нет	каталог аксессуаров, приоритет разработки
Где сверлят платформу	штатного интерфейса не хватило; каждое чужое отверстие — недостающая позиция паза или аксессуар	интерфейс платформы, каталог
Как грузят	реальные сценарии груза и распределение массы	сценарии груза в product.json (15и)
На каких машинах	багажник на машине, для которой не делали — спрос на программу	очередь вывода машин
Что ломается и как чинят	рекламации, которые не дошли	библиотека отказов, валидатор

Механика сбора: посты по хэштегам и упоминаниям; готовый ИИ читает и раскладывает по меткам — аксессуар, машина, модификация, отказ, сценарий. Не аналитика больших данных, а еженедельная сводка: «12 постов с самодельным креплением лопаты за месяц». Плюс материал для маркетинга с разрешения автора.

Шестой критерий — полевой

Критерии приёмки выстраиваются в цепочку: метрология, целостность, распознавание порталом — производство; посадка по скану — монтаж; входной контроль поставки; и полевой — изделие приняли не Blechcon и не лаборатория, а дорога и люди. По серийникам видно, какая ревизия стоит у кого; отзыв и улучшение — адресные, а не всей серии.

15л. Модель версий: уроки Onshape

Источник — статья «Under the Hood: How Collaboration Works» Ильи Барана, VP по архитектуре Onshape (единственный CAD с Git-подобным ветвлением). В ней описан принцип, к которому мы пришли сами — «истина — определение, геометрия — артефакт», — доведённый до конца за десять лет. Onshape как продукт нам не подходит (облако РТС в США), но модель данных берём.

Как устроено у Onshape

Три типа данных разделены жёстко: состояние интерфейса не хранится; определение — список операций, имена, импорт — единственное, что лежит в базе; результаты перестроения — B-Rep, треугольники, ошибки — кэшируются и всегда перестраиваются из определения.

Микроверсия: определение — вечный неизменяемый объект; любое изменение создаёт новую микроверсию со ссылкой на родителя и самим изменением («глубина Extrude 1 → 4 дюйма»). Вся эволюция хранится, любое состояние восстанавливается.

Устойчивые изменения — ключевая находка: изменение адресует операцию по внутреннему постоянному идентификатору, не по позиции; пока исходная операция существует, изменение применимо к другой микроверсии. Поэтому правки нескольких людей ложатся на последнюю версию, не мешая друг другу.

Ветвление: рабочее пространство — указатель на последнюю микроверсию; микроверсии образуют дерево. Слияние — найти изменения из «откуда», которых нет в «куда», создать микроверсию с ними. Сознательное отличие от Git: конфликтов не бывает — при разном изменении одного размера побеждает «откуда», пользователь никогда не блокируется. Отмена — не откат, а применение обратного изменения поверх последней версии: моё отверстие исчезает, чужое скругление остаётся. Compare — сравнение версий на тех же неизменяемых микроверсиях.

Что берём

У Onshape	У нас	Статус
определение / результат	project.json / STEP-артефакты	есть; формализовать: STEP — кэш, не истина; в Git только для релизов
микроверсия с родителем и дельтой	плоский журнал	сделать: каждая операция — объект с хешем родителя
адресация по постоянному ID	отверстия по центру, стенка по нормали и площади	частично; довести до правила для всех операций
переигрывание на новом родителе	нет	главное: журнал применяется к новой ревизии исходника — Ranger-кронштейн v2 получает те же правки
ветки и слияние без конфликтов	нет	на уровне журнала, правило «источник побеждает»
сравнение версий	нет	геометрический diff: грани добавлены, удалены, сдвинуты — подсветкой
тесселяция по требованию, кэш	кэш Streamlit	формализовать: кэш по хешу микроверсии
FeatureScript	генератор на Python/OCCT	подтверждение абстракции; ничего менять

Где у нас сложнее

У Onshape своё ядро, и оно ведёт постоянные идентификаторы граней через перестроения. У OCCT их нет — это известная проблема топологического именования, на которой FreeCAD бился годами. Мы адресуем элементы геометрическим отпечатком: тип, нормаль, центр, площадь. Для листовых деталей это работает — так уже находятся отверстия и стенки. Универсально — нет; это признано.

Ещё две UX-идеи Onshape для нашего просмотрщика: синхронный показ развёртки и согнутой детали (клик по грани в одном окне подсвечивает её в другом) и визуальное сравнение ревизий

детали.

16. Инфраструктура: решения по железу

Почему Германия — самые дешёвые серверы мира: промышленные энергоконтракты + free cooling, DE-CIX (почти бесплатный трафик → unlimited), ЦОДы в дешёвой провинции при толстой оптике, культура ценовой конкуренции (Hetzner/netcup — семейные компании без инвесторов), вертикальная интеграция с десктопным железом. AWS отвергнут: 6–8× цена инстанса, egress ~0,09 \$/ГБ убивает VDI-потоки (у Hetzner unlimited), CLOUD Act против data sovereignty, сложность без пользы. Совместимость бесплатна (Docker переезжает за день), зависимость не нужна.

Роль	Решение	Статус/цена
Целевой сервер (ядро+VDI 8-10 сессий)	Hetzner EX44: i5-13500 (быстрый однопоток — ключ к отзывчивости), 64 ГБ, 2×512 NVMe RAID 1, unlimited, FSN1	€70,21, setup 0, почасово; Limited-волны — подписка на availability, правило 15 секунд на заказ
Параллельный канал	Server Auction (Robot → Server Market): запросы «i5-13», «i5-12», «i7-12»; NVMe, не HDD; ничего старше 12-го поколения	критерий: ≤ €75-80
План Б (через ~3 недели)	OVH RISE-S: Ryzen 9700X (лучший однопоток), 64 ГБ, Frankfurt/Strasbourg, месяц-к-месяцу	€78 + €78 setup
Отвергнуто	AX41 (Zen 2 2019 за те же €70), AX42 (€118 за 35-Вт чип), EX63 (€177 — переплата за ядра), i9-13900 аукцион (€165 — рано), Contabo (CPU steal)	—
Масштаб (этап 5, 10+ сессий)	OVH RISE-L (9950X, 128 ГБ, €179) — вытеснил AX102 (€308); i9 с аукциона	по факту роста
Уже есть	ThinkPad i7-8850H/32ГБ/Quadro P1000 — рабочее место + локальный старт этапа 1 (Git, build123d, FreeCAD; диск 54 ГБ свободно — Docker позже); Strato VPS 2/2/90 — Gitea+WireGuard и/или вторая копия бэкапа; Hetzner CPX — CI	0 € новых
Второй провайдер	netcup: RS G12 (выделенные EPYC-ядра, ECC, дешево) — бэкап сейчас (~5 €), в будущем возможное отдельное ядро (Gitea+CI) при VDI на десктопном CPU; EPYC-однопоток слаб для VDI	~5 €/мес

Три входа Hetzner: accounts (паспорт) → Cloud Console (облачные CPX) и Robot (dedicated: заказ, rescue, Server Market). EX44 после поставки: rescue → installimage → Ubuntu 24.04 LTS + RAID 1 → SSH-ключ, ufw (наружу только SSH+WireGuard), unattended-upgrades, бэкап в Storage Box (~4 €) + вторая копия у netcup. Домен: поддомены git./work./cdn. существующего домена (или отдельный технический ~15 €/год) — Let's Encrypt, стабильность при переездах, разделение контуров; рабочие поддомены могут резолвиться только внутри WireGuard. Авторизация — три непересекающихся контура: рабочий (локальные аккаунты Gitea+Kasm + TOTP 2FA + WireGuard-периметр; SSO/Keycloak после 20 человек), клиентский (Shopify Customer Accounts / Google — конфигуратор наследует), сообщество (OAuth GitHub/Google в публичной Gitea). Бюджет полной системы при 100 зарегистрированных (пик 20-25 сессий): ~150-200 €/мес.

Стоимость владения: только open source

Категория	Инструменты (все бесплатны, без подписок)
CAD и генерация	FreeCAD + SheetMetal + аддоны (GPL/LGPL), build123d/CadQuery (Apache)
Версии и сервер	Git, Gitea, Git LFS, zippey; Ubuntu, Docker (self-hosted), WireGuard, ufw; Let's Encrypt; Cloudflare free (CDN)
Расчёты	CalculiX + Gmsh (статика, модальный), OpenFOAM (CFD разово)
Рендер и артефакты	Blender headless, SheetNest (раскрой), gltfpack/Draco (GLB)
VDI	Kasm Community Edition (до 5 одновременных сессий); без лимитов — Apache Guacamole / webtop-образы linuxserver.io

Категория	Инструменты (все бесплатны, без подписок)
Визуализация	Mermaid/Graphviz (граф зависимостей), React Flow/Rete.js (composep, этап 5), Sverchok (нодовое моделирование)
Конфигуратор	Unity Personal — бесплатен до \$200k годовой выручки с продукта; единственный инструмент с порогом; бесплатная альтернатива при необходимости — three.js/Babylon.js

Платные строки проекта — только три, все приняты осознанно: серверы (~70–200 €/мес по росту), токены Claude/API (~20–50 €/мес на старте), физический мир (FDM-принтер разово 300–500 €; испытания ISO 11154 — разовые тысячи €). Правило проекта: инструмент входит в стек, только если он open source или бесплатен для нашего масштаба без подписки; платными могут быть только вычислительные ресурсы и физические вещи; кандидат на платный инструмент требует явного решения владельца с бесплатной альтернативой в кармане.

Claude как копилот — четыре слоя: (1) Claude Code на сервере — админ-диалог вместо ручного Linux; (2) MCP-FreeCAD headless — двигатель промпт-слоя; (3) в CI неинтерактивно (claude -p): упал валидатор → фикс коммитом в ветку → ревью человеком; перевод сданных STEP в черновики генераторов; (4) в VDI-образе подрядчика — отдельный API-ключ с лимитом и системный промпт RECADA (ядро невидимо). Правило: Claude ходит через те же двери, что люди (ветки, PR, валидатор), автор коммита «LLM via MCP» с промптом в сообщении. Бюджет 20–50 €/мес на старте.

17. Граф зависимостей конструкции и автоматизация

Граф зависимостей — визуальная карта конструкции: узлы — файлы истины (паспорта, скелеты, генераторы, детали, сборки, конфигурации), стрелки — «читает из». Зависимости в системе объявлены явно, поэтому карта строится автоматически скриптом CI (Mermaid/Graphviz, бесплатно) — рисовать руками ничего не надо, схема всегда актуальна. Главный режим — анализ изменения: перед merge CI отвечает «что пересоберётся, если принять этот PR» — список и подсветка на схеме (красное = затронуто, отдельно помечаются released-детали). Каскад «что за что тянет» становится видимым ДО нажатия кнопки; это же — инструмент онбординга (новый человек понимает систему за час по карте) и диагностики (где в цепочке красный валидатор). Делается на этапе 2 рядом с валидатором.

Автоматизация бизнес-событий — простыми скриптами и webhook в CI, без отдельного оркестратора: складской webhook Shopify (остаток A=0 → политика run-out → активировать Б → уведомление), онбординг (тест пройден → карточка исполнителя → письмо), мониторинг (релизный тег → сводка в канал; CI красный сутки → алерт), маркетинг (релиз → рендер → черновик карточки через LLM на утверждение), продажи как источник ТЗ (форма «нет крепления?» → issue + счётчик спроса → 3 запроса = приоритет в разработку). Граница неизменна: автоматизация не трогает геометрию и не пишет в main — всё, что меняет истину, идёт через PR и валидатор. Скрипт создаётся под событие, случившееся руками трижды. Нодовый composep поверх библиотеки кубиков (React Flow/Rete.js — открытые) — этап 5: интерфейс для не-программистов (дилер-CPQ, клиент с шаблоном); свой Grasshopper не делать (есть Sverchok/FreeCAD-ноды — бесплатные).

18. Финансовая модель — каркас

Поставщики и данные для честной экономики: структурированный архив счетов Blechcon и тарифа GLS с первого заказа + pre-flight nesting (знать справедливую цену резки до запроса) + периодический ручной бенчмарк 1–2 европейских альтернатив + квалификация второго поставщика как страховки от монополии. Полный API-аукцион нескольких сервисов отвергнут: правила валидатора = правила конкретного производителя, несколько поставщиков = кратная поддержка DFM-правил.

CM1 (маржа комплекта) = Цена – металл – Blechcon – профили – крепёж/покрытие – упаковка/доставка – комиссия канала
CM2 (с учётом дизайна) = CM1 × ожидаемые продажи модели – (турниры + часы владельца × ставка + прототипы + паспорт)
Операционная = Σ CM2 – постоянные (инфраструктура, время, маркетинг, склад)

Ориентир отрасли (4x4-аксессуары): валовая 45–60% в рознице, 30–40% через дилеров; ниже ~35–40% от розницы — чинить до масштабирования. Ключевой вопрос системы: за сколько проданных комплектов окупается вывод новой машины. Для расчёта нужны 8 цифр: розничная цена комплекта и канал; счёт Blehson за комплект ног (или масса); €/метр профиля и метраж; крепёж/уплотнители/покрытие; упаковка+доставка; текущие и плановые объёмы; внутренняя ставка часа владельца; текущая стоимость вывода машины по-старому. Метрика №2 включает доставку металла — юнит-экономика честная.

19. Управленческий слой: роли подробно

Роли — это не должности, а зоны ответственности с чёткими правами решений; в малой команде один человек совмещает несколько ролей, но границы решений остаются письменными. Принцип: у каждого решения — один владелец; «решили вместе» = не решил никто.

Роль	За что отвечает	Права решений	Доступы	Время
Owner (владелец)	Стратегия и деньги; приоритеты трубы (что делаем следующим); критерии приёмки; доверие людям; отношения с Blehcon и ключевыми партнёрами; развитие системы (ворота этапов)	Единолично: релизная кнопка (tag), бюджеты трёх конвертов, повышения по лестнице, изменение интерфейса платформы, изменение released-деталей (go на issue), допуск инструментов в стек (FOSS-правило)	Полный: Git-admin, сервер root, Robot/Cloud Hetzner, Shopify, банк	Цель — сжатие до управления трубой; всё, что затягивает внутрь (рисовать, чинить CI), — сигнал незакрытой роли
Lead Reviewer	Первичная приёмка всех PR (геометрия, посадка, собираемость, экономика по BOM, эстетика); ведение исполнителей (ответы на вопросы к ТЗ, разбор отказов валидатора); формулировка ТЗ вместе с Owner; наставничество новичков; предложение правил в rules/из повторяющихся ошибок	Merge в main для деталей (кроме изменений интерфейса и released — эскалация Owner); отклонение работ; распределение задач по скамейке; эскалация повышений	Git: merge-права на products/accessories; чтение generators и rules; Gitea-канбан; без root сервера	Первая делегируемая роль — решает bus factor: минимум раз в месяц проводит приёмку полностью без Owner. Отбор — по качеству мышления в комментариях, не по скорости черчения (принцип Питера)
Senior Engineer	Сложные узлы и новые типы деталей (топология); перевод «песочница → код» (реверс в генераторы); развитие библиотеки кубиков; калибровка FEM по эталонным отчётам; сложные паспорта (windshield-поверхности)	Коммиты в generators/через PR; создание веток convert/*; предложение новых кубиков; техрешения внутри ТЗ без согласования	Git-доступ (режим Б: локальная работа + push), выбранные репозитории; VDI по желанию; без прав merge в main	Вырастает из проверенных по логам (устойчивое качество + коммуникация); финальное доверие — личное решение Owner
Engineer (проверенный)	Прямые задачи по готовым шаблонам и ТЗ: адаптеры, вариации ног, паспорта аксессуаров по чек-листу; печатные примерки своих деталей	Работа в своей ветке; сдача через PR; вопросы к ТЗ приветствуются (логируются как сигнал роста)	VDI-сессия с расширенным набором репозитория; либо локально + Git по решению Owner	3+ принятых работы; сдельная оплата выше новичка; очередь на задачи
Engineer (новичок)	Тестовые и простые задачи строго по ТЗ; работа только в изолированной VDI-сессии	Только своя ветка своей задачи; ничего кроме	VDI-сессия: один репозиторий задачи, egress только Gitea, водяной знак, без скачивания	Вход свободный, платный тест с автоприёмкой; риск компании — сотни евро

Роль	За что отвечает	Права решений	Доступы	Время
Ops (инфраструктура)	Сервер, Docker, Gitea, Kasm, WireGuard, бэкапы (+ квартальный тест восстановления!), обновления с фиксацией версий, мониторинг, онбординг/оффбординг аккаунтов (одна процедура: ключи, сессии, права)	Плановые обновления и правки конфигурации; экстренные действия при инцидентах с пост-отчётом Owner; HE решает про доступы людей (это Owner)	Root сервера, admin Gitea/Kasm; без прав в конструкторские репозитории по содержанию	10–20% времени одного человека; на старте совмещает Owner (+Claude Code как копилот), позже — первый кандидат на ау тсорс/частичную занятость
Технолог Blehcon (внешняя)	Производственное ревью выпускаемых деталей («если гнуть иначе — на 15% дешевле»); консультации по граничным случаям DFM	Рекомендательные; замечания конвертируются в правила rules/ через PR (цикл CAPA)	Получает только конкретные DXF/STEP по заказу; доступа в систему не имеет	По договорённости, возможно платно; дешёвый канал чужого производственного опыта

Правила совмещения и роста

На старте: Owner совмещает Lead Reviewer и Ops (с Claude как копилотом обеих ролей), Senior — по мере появления. Порядок делегирования: сначала Lead Reviewer (снимает приёмку — главный пожиратель времени Owner и единственное лекарство от bus factor), затем Ops, затем постановка ТЗ. Несовместимость: автор детали не может быть её единственным ревьюером — подпись на released всегда чужая; Ops не решает про доверие и доступы людей. Каждое повышение = расширение доступов по гибридной модели (VDI-only → +репозитории → Git локально → merge-права) и фиксируется в карточке исполнителя в Gitea. Оффбординг любой роли — одна процедура: отзыв WireGuard-ключа, закрытие сессий, ревизия прав, чек передачи незавершённого.

Ритм и бюджет (без изменений)

Релизный такт 2 недели; еженедельный 30-мин обзор трубы (канбан); месячный бизнес-срез (юнит-экономика, метрики); квартальные ворота со стоп-лоссами. Бюджет — три конверта: Infra (~50–150 €/мес фикс), Design (N деталей × целевая стоимость), System-dev (только под ворота); часы Owner — всегда отдельной строкой по внутренней ставке.

№	Метрика	Смысл
1	Время «задача → released»	скорость трубы
2	Полная стоимость released-детали (исполнители + часы владельца + прототипы + доставка металла)	честная цена дизайна
3	Доля прохода валидатора с 1-го раза	качество пула и ТЗ
4	Время добавления новой машины	главная метрика системы
5	Доля выручки от деталей без участия владельца в рисовании	освобождённость владельца

20. Риски и узкие места

Риск	Суть и защита
Обратный поток правок (№1)	Ручная правка в GUI не возвращается в params → два источника истины → смерть системы. Ручное — только песочница; в систему — через параметры/генератор; STEP на Blehcon — только из CI технически.
FreeCAD/SheetMetal	Community-аддон с пределами (SMBendWall, boolean OCC, 7-й фланец — предвестник: реальные крыши грязные, паспорт может расщепиться по комплектациям). Правило 80/20: экзотика руками вне конвейера — это нормально.

Риск	Суть и защита
LLM-слой	Валидатор не ловит «корректную глупость» — человеческое ревью остаётся; время владельца — узкое место.
Bus factor = 1	Lead reviewer реально проводит приёмку без владельца минимум раз в месяц.
Score creep	Система строится только вслед за реальным заказом; ворота со стоп-лоссами; чужие ревью концепта фильтровать вопросом «что убрать?» — оба присланных списка только добавляли.
Вы — IT-отдел	Gitea/CI/Kasm/VPN — скрытые 10–20% времени, учитывать в бюджете.
Заморозка интерфейса	Максимум внимания при минимуме информации; после продаж менять нельзя (legasy или слом совместимости).
Внешние зависимости	Shopify API, three.js, аддоны — версии фиксируются; восстановление из бэкапа тестируется ежеквартально.
Дешёвый аутсорс	Не бесплатен: ТЗ и ревью — часы владельца; смягчение — валидатор и сдельность.

Риски, добавленные по итогам практики (сентябрь 2026)

Инструмент — один файл без автоматических тестов; библиотека как регрессия — первое лекарство. Зависимость от версии OCCT: 7.8 в FreeCAD и 7.9 в ядре ведут себя по-разному — стоило полдня; фиксировать версию ядра и не смешивать. Третий критерий проверяется руками через чужой портал, который может измениться без предупреждения — вести журнал ответов портала как данные, чтобы изменения были видны.

21. Дорожная карта

Ближайший порядок работ — конкретно

Шаг	Что	Зачем
1	установка сервера: ОС, ключи, ufw, WireGuard, restic на Storage Box (Хельсинки)	база и бэкап в другом ДЦ
2	разделить ядро и интерфейс, очередь задач, постоянное хранилище	многопользовательность
3	сканер библиотеки: пакетный обмер, таблица, статистика	данные вместо догадок
4	регрессия на CI по библиотеке: процент прохождения трёх критериев	не ломать работающее
5	калибровка К-фактора по ответам портала	развёртки точнее
6	каталог разгрузок → генерация зоны гиба по правилу	параметрика углов проходит производство
7	гибридный workbench FreeCAD (вызов внешнего инструмента)	инженер рисует руками, считает ядро
8	паспорта автомобилей в библиотеке → редактор изделия на данных	багажник как параметры

Этап	Содержание	Статус
0. Фундамент	Реверс Bracket_L/R (метрология 100%), wind_side_v2, Skeleton_Ranger + MasterParams, паспорт Ranger, DFM-правила как skills; решения по железу зафиксированы (EX44-критерий)	Сделано
1. Хребет	Локальный старт на ThinkPad: git init + структура + build123d + первый генератор L-кронштейна с автосверкой (вечер №1); Gitea+WireGuard (Strato или сразу EX44 по прибытии); первый CI «params → STEP+GLB»; step_probe.py (обмерщик STEP на AAG) как первый модуль библиотеки; zipreу; 7-й фланец (BSpline)	Первый шаг

Этап	Содержание	Статус
2. Валидатор и каталог	Валидатор DFM+ (cad-khana + зазор 20/упаковка GLS (40 кг/коробка)/крепёж) + геометрический дифф в PR; spec.yaml + автогенерация приёмочного прогона из constraints; catalog.json; статусы двух осей + webhook Shopify; SheetNest; рендер-конвейер; автосхема конвейера (Mermaid); архив счетов Blehcon и тарифа GLS (пороги надбавок — в rules/, честная доставка в CM1); параллельный трек испытаний: собрать существующие отчёты (статика, модальный) как эталоны калибровки; запланировать физические испытания ISO 11154 с расчётным обоснованием	
3. Рабочие места	Kasm CE на EX44 (пентест лично, вкл. Python-консоль); egress-файрвол; RECADA-workbench; Claude в VDI-образе с лимитированным ключом	
4. Люди	Onboarding-пакет EN; воронка Upwork+hh.uz с пробой канала; автотест с автоприёмкой; GDPR-оформление; такт 2 недели; YAML-инструкции; светофор нагрузки; скрипты CI: складской webhook и онбординг	
5. Масштаб	Вторая машина по конвейеру; lead reviewer; библиотека узлов → нодовый composer (CPQ с PDF-КП для дилеров; быстрый внутренний прототип панели параметров — Streamlit, выход строго в params.json/Git, чтобы не плодить второй источник истины); FEM в валидаторе (CalculiX+Gmsh: статика с нормативной аэронагрузкой, Мизес с запасом 1.5, прогиб подтверждает зазор 20 мм, модальная проверка $f_1 \geq$ порога по Струхалю, автоотклонение PR с картой напряжений; калибровка по существующим отчётам); ИИ-агент паспортов (STL → распознавание отверстий/нормалей → черновик vehicle_passport + PR; подпись человека обязательна); второй поставщик металла; публикация спецификации интерфейса; сообщество; узел Сингапур/Мумбаи при 40+ ч/мес; RISE-L/i9 при 10+ сессиях; контент-маркетинг; ISO-формализация по запросу рынка	

Формула проекта: мозг и знания — в Германии (структурно самой дешёвой серверной стране), руки — где угодно (пиксели вместо файлов, любой CAD на входе, STEP на выходе), приёмка — автоматическая, рост людей — по логам, а не по резюме. Деталь описывается один раз параметрами; производство, конфигуратор, инструкции и склад — производные одного конвейера. Владелец управляет трубой: приоритеты на входе, критерии приёмки, кнопка релиза.

Дополнение к ревизии 43 · 6 сентября 2026

Ревизии до 42 включительно — основной документ. Далее — разделы, добавленные в v43.

История ревизий (продолжение)

Рев.	Дата	Что добавлено
v43	06.09.2026	15м материалы и технологии; учёт времени по журналу; легенда: сплавы, стали, полимеры, покрытия

15м. Материалы и технологии

У каждой группы деталей свой материал, своя угроза и своя технология. Материал — атрибут детали в BOM с плотностью, классом коррозионной стойкости и классом УФ; из этого система считает массу, проверяет гальванические пары по графу связей, ловит наружную деталь без УФ-класса и ведёт замену материала как продуктовый параметр без перестроения геометрии.

По группам деталей

Деталь	Материал	Угроза	Технология
Профили платформы (S13A, B13A)	алюминий 6060/6063 T6; 6082 T6 при запросе прочности (+30 %, экструзия сложнее)	гальваника в стыке с нержавеющей; прочность задаёт сечение, не сплав	экструзия; анодирование или порошок
Ноги, кронштейны, дефлектор	1.4301 t = 2–3 мм; для соли и побережья — 1.4404 / 1.4571 (+30–40 %, гнётся и режется так же)	питтинг от хлоридов у 1.4301 через 2–3 сезона	лазер + гибка у Blehcon; порошок
Подкладки	EPDM	NBR трескается от озона и УФ за год-два	вырубка
Уголки, заглушки, крышки	ASA или PA6 GF с УФ-стабилизатором; чёрный держит УФ лучше (сажа как стабилизатор)	ABS и PLA — не для наружки	литьё под давлением; ASA/PA12-печать для малых серий
Крепёж	DIN, класс A2; A4 для прибрежной версии	гальваника без изолирующих шайб	каталог
Прототипы	PA12 (SLS/MJF); единичная гибка у Blehcon	PLA не держит ничего	3D-печать

Гальваническая пара — главный враг

Нержавейка на алюминии в мокрой среде: корродирует алюминий. Три защиты: изолятор между металлами (резиновые подкладки — правило валидатора из 15и: контактов без изолятора ноль); крепёж A2/A4 с изолирующими шайбами; анодирование или порошок алюминия как барьер. Плюс дренаж: вода не должна стоять в стыке — проверяется по геометрии узла.

Ультрафиолет — про полимеры и покрытия, не про металлы

Порошковая краска: полиэфирная держит УФ, эпоксидная мелеет за сезон — для наружки только полиэфир или гибрид с наружным полиэфиром. Анодирование вечно по УФ, но царапается и ограничено в цвете. Резина — EPDM. Пластики — ASA вместо ABS, PA6 GF с УФ-стабилизатором, PA12 в печати.

Продуктовые следствия

«Прибрежная версия» — замена 1.4301 на 1.4404 и A2 на A4 без изменения геометрии: продуктовый параметр в product.json, другая строка BOM, другая цена. Сварки нет — и правильно: разборность, нет зон с изменённой структурой в нержавеющей, простая логистика в коробке. Конкуренты используют те же материалы: конкурентное поле — не материал, а масса на м² и стойкость покрытия (15и).

Карточки материалов в библиотеке: плотность, предел текучести, модуль, класс коррозии, класс УФ, цена за кг — те же цифры идут в BOM, в валидатор и в CalculiX для прочности.

Учёт времени по журналу

Каждая операция в project.json получает время и автора. Без дополнительного ввода считаются: сквозное время от загрузки до «годен»; чистое время работы по интервалам между операциями с порогом простоя; число итераций через портал; время по типам — реверс, правки, ожидание поставщика. Git даёт то же для генераторов. По накоплении библиотеки — оценка новой работы по ближайшим похожим деталям: «пространственный кронштейн с семью гибками — три часа, Г-образный с двумя — сорок минут». Нужно для плана

вывода новой машины в часах, цены заказных работ, раздела 8 (рост по результатам в логах) и контрольной точки «Ranger быстрее Defender». Оговорки: время размышления в FreeCAD журнал не видит — отметка руками или коммиты; данные — для планирования и оценки, доступны самому инженеру, не секундомер для сравнения людей.

Легенда (дополнение v43)

Термин	Пояснение
6060 / 6063 / 6082	алюминиевые сплавы для экструзии профилей; 6082 на треть прочнее, но сложнее в экструзии
1.4301 / 1.4404 / 1.4571	нержавеющие стали (AISI 304 / 316L / 316Ti); 316-серия с молибденом стойка к хлоридам — соль, побережье
A2 / A4	классы нержавеющей крепежа (304 / 316)
EPDM / NBR	резины: EPDM стойка к УФ и озону — для подкладок; NBR трескается за сезон
ASA / ABS / PA6 GF / PA12	пластики: ASA держит УФ (ABS — нет); PA6 со стеклом для нагруженных; PA12 для 3D-печати SLS/MJF
Порошок полиэфир / эпоксид	полиэфирная краска держит УФ; эпоксидная мелеет за сезон — только внутрь
Гальваническая пара	коррозия алюминия в контакте с нержавеющейкой в мокрой среде; защита — изолятор, крепёж A2/A4 с шайбами, покрытие, дренаж

Дополнение к ревизии 44 · 6 сентября 2026

Обзор внешних ресурсов: ядра, библиотеки, открытый код. Что берём, что закрыто, что слабее.

История ревизий (продолжение)

Рев.	Дата	Что добавлено
v44	06.09.2026	15н внешние ресурсы: ОССТ 8.0.1, YouCanNotUnfold, китайские и российские ядра

15н. Внешние ресурсы: что берём и чего не берём

Обзор на 6 сентября 2026. Проверены: состояние ядра ОССТ, открытые библиотеки развёртки на GitHub, собственные ядра Китая и России. Вывод: брать стоит одно — и оно совпадает с нашим подходом до деталей.

Состояние ядра

Актуальная версия — 8.0.1 от 30 июля 2026; до неё патч 8.0.0r1 в июне (переработано построение поверхностей Гордона: экспериментальную реализацию заменили новой с явным статусом и запасным приближённым режимом). Восьмёрка живёт три месяца и дважды стабилизировалась — мажорный релиз перестал быть рискованным. Сверх записанного в v31: переход на C++17, стандартные исключения, BRepGraph как замена обходу дерева через TopExp_Explorer с индексными картами — это самое долгое место в нашем обмере.

Для нас сегодня не меняется ничего: наше ядро приходит через cadquery-оср, собранный под 7.9.3; пока ОСР не пересоберут под восьмёрку, переходить некуда. Проверять появление раз в пару месяцев. Порядок прежний: сначала библиотека и регрессия, потом переход — API сломано, поведение булевых могло измениться. FreeCAD по-прежнему: стабильная ветка 7.8, dev 7.9.

YouCanNotUnfold — единственное, что стоит взять

Автор Александр Нойфельд, лицензия LGPL-2.1, интегрировано в основной Sheet Metal Workbench FreeCAD. Развёртка листового металла, построенная на networkx — как и наш обмер; автор указывает, что это даёт заметный прирост скорости против штатного развёртчика и позволяет разворачивать формы, которые тот не берёт.

Что там есть	Чем полезно нам
unfold.py на networkx	сравнить их граф с нашим FTG; возможно, решена часть того, где мы застряли с разгрузками
test_cases + test_unfold.py	готовый набор тестовых деталей с тестами — ровно та регрессия, которую собираемся строить
svg_writer.py	вывод развёртки в SVG; дополнение к нашему DXF
LGPL-2.1	совместимо с использованием в нашем проекте

Китайские и российские ядра — закрыто и слабее

Собственных ядер пять: Overdrive (ZWSOFT, куплено у американской VX в 2010), DGM (Huayun / CrownCAD), CRUX IV (Shandong Huatian), AMCAH (Университет науки и техники Китая), CASGEO (Академия наук КНР). Плюс российское C3D (АСКОН).

Все — закрытые коммерческие, лицензируются как продукт. Китайские обзоры сами признают: Overdrive уступает CGM, ACIS и Parasolid в синхронной технологии, свободных поверхностях и обработке скруглений — то есть даже при доступности это не шаг вперёд относительно ОССТ. C3D сильное, с листовым модулем, но коммерческое и для немецкой компании в текущей ситуации неработоспособно.

Неожиданное подтверждение выбора: в академической работе P3D-Bench (июнь 2026) CadQuery на ОССТ числится среди референсных инструментов для генерации параметрического CAD моделями. Научное сообщество использует ровно наш стек — ОССТ плюс Python — как основу экспериментов с ИИ-генерацией.

Итог обзора

Брать нечего, кроме YouCanNotUnfold: там наша задача, наш подход (networkx поверх ОССТ) и готовые тесты. Остальное закрыто, слабее или недоступно. Позиция «всё на нашем ядре» подтверждается внешним обзором, а не только принципом.

Дополнение к ревизии 45 · 7 сентября 2026

Скорость, удалённая работа, найм и права: что добавлено по итогам обсуждения 6–7 сентября.

История ревизий (продолжение)

Рев.	Дата	Что добавлено
v45	07.09.2026	15o скорость: девять идей с приоритетами; 15п удалённые столы: способы, Guacamole и Kasm, география; 15р найм: три профиля, тесты системой; 15с права и коммерческая тайна

15о. Скорость: что ещё ускоряет вывод багажника

Отобрано тем же фильтром, что отсеял «фундаментальные» и «геймдев» идеи: берём только то, что ускоряет вывод изделия, а не украшает систему. Девять идей; три с самым большим рычагом — спринт как протокол, испытания по семейству, цена в контуре.

#	Идея	Почему быстрее	Приоритет
1	Спринт новой машины: паспорт из Aufbaurichtlinien и OEM → подбор ног из семейства по библиотеке → product.json v0 → проверки → пакет → портал → цена. Показатель: часов от данных до предложения Blechcon	вывод машины из проекта становится процедурой; Ranger — первый прогон	высокий
2	Испытания по семейству, не по машине: CalculiX откалиброван по стенду ISO 11154; новый кронштейн внутри проверенного диапазона обосновывается расчётом со ссылкой на испытанного родственника	одно испытание на семейство ног вместо одного на машину — самая большая экономия в цепочке	высокий
3	Цена в контуре: стоимость у Blechcon как функция длины реза, гибов, материала, партии; калибруется по реальным предложениям	каждое изменение конструкции показывает евро сразу	высокий
4	Ограниченный перебор: ночной прогон толщин, ширин полок, рисунков отверстий через CalculiX и валидатор — утром фронт Парето масса / жёсткость / цена	человек выбирает из проверенных вариантов	средний
5	Раскрой как подсказка: отношение площади заготовки к её выпуклой оболочке	«поверни фланец — минус 8 % материала», одна строка валидатора	средний
6	Заказной адаптер по загрузке клиента: STEP или скан аксессуара → ближайший интерфейс → адаптер растяжением проверенной детали → цена и срок	индивидуальные решения по цене серийных, новый B2B-канал	средний
7	Карточка товара как артефакт product.json: размеры, масса, высота, аксессуары, инструкция → страница Shopify	никогда не расходится с изделием	средний
8	Комплект обновления как разность ревизий: diff двух product.json → BOM «что докупить»	продажа существующим клиентам без новой конструкции	низкий
9	Второй профиль поставщика: два набора DFM-правил в валидаторе	деталь не зависит от одного цеха	низкий

Отсеяно по тому же фильтру: AR-инструкции, проверка посадки по фото с телефона клиента, «граф знаний всего».

15п. Удалённые столы: способы, выбор, география

Сервер EX44 есть; удалённый инженер работает на нём, данные не покидают сервер. Выбор способа зависит от того, что отдаётся: весь стол, одно приложение или только 3D-окно.

Способ	Что это	Плюс	Минус
xrdp	Linux-стол по RDP, клиент встроен в Windows	самый экономный, терпим к задержке, нулевая настройка у клиента	3D идёт картинками, вращение вязкое
Guacamole (Apache)	шлюз RDP/VNC/SSH через браузер	открытый, бесплатный без ограничений, запись сессий, 2FA, запрет буфера и файлов	сам ничего не запускает — нужен стол
Kasm Workspaces	стол в одноразовом контейнере на пользователя, в браузере	полная изоляция, водяные знаки, запреты встроены	тяжёлый; бесплатен до 5, дальше лицензия
Selkies	WebRTC-стол в браузере, открытый	видеопоток, плавное 3D	настройка, кодирование ест CPU
Xpra	одно приложение как отдельное окно у клиента	экономнее полного стола	—
NoMachine	протокол NX	очень эффективный	закрытый, лицензия для компании
Sunshine + Moonlight	игровой стриминг	минимальная задержка	под GPU; без него грузит CPU
Стриминг вьюпорта ОССТ	только 3D-окно (15в)	легче и защищённее всех	только просмотр и выбор

Guacamole против Kasm: Guacamole — дверь к столу, Kasm — стол в контейнере. Для доверенной команды до пяти человек — Guacamole с xrdp: проще, легче, бесплатно. Для недоверенных подрядчиков — Kasm: изоляция по контейнеру. Не исключают друг друга; Kasm в резерве до первого внешнего исполнителя.

Рекомендуемая схема: WireGuard (личный ключ) → Guacamole (2FA, запись, буфер выключен) → xrdp-стол с FreeCAD, инструментом и Blender. Всё открытое, всё на EX44, стоимость ноль. Для интерактивного Blender с тяжёлыми сценами без GPU тесно — рендеры пакетно ночью.

География и задержка

Скорость определяет физика, не софт: Восточная Европа и Турция 30–50 мс, Северная Африка и Ближний Восток 60–90, Индия 130–180, Юго-Восточная Азия 180–220, Латинская Америка 200–250. До 80 мс — как местная работа; 100–150 терпимо; выше 150 — каждый клик с запозданием, 3D мучительно. Софт вносит единицы миллисекунд; протокол — заметно: RDP и Xpra передают команды интерфейса и терпят задержку, Kasm и Selkies стримят видео и на далёком канале мутнеют. Для дальних стран — Guacamole с RDP. Важнее обоих — канал подрядчика: проводной от 10 Мбит с ровной задержкой, проверять тестом до найма. Второй сервер ближе к подрядчику не поможет: данные в Германии, переносить их — та утечка, которую исключили.

Комфортная зона по задержке — Восточная Европа, Балканы, Турция, Кавказ, Северная Африка: любой протокол, полноценная работа с 3D. Индия и Юго-Восточная Азия — для задач без активного вращения: параметры, проверки, библиотека, инструкции. Совпадает с раскладом ставок раздела 9.

15р. Найм: три профиля и тесты самой системой

Система меняет профиль того, кого искать: форму задаёт владелец, инструмент считает, проверяет и упаковывает. Три уровня — три разных найма.

Профиль	Что делает	Уровень	Где и как
Инженер-оператор системы	гоняет детали через реверс и портал, ведёт библиотеку и паспорта, переносит Aufbaurichtlinien в JSON, собирает пакеты для Blechcon, правит инструкции	младший или средний по листовому металлу, знающий гибку руками	постоянный, география до 80 мс; недорог — правила в валидаторе, не в голове
Конструктор аксессуаров	создаёт то, чего нет: интерфейс между чужим объектом (бокс, тент) и платформой; варианты концепции с компромиссами; нагрузки, вибрация, ветер, доступ руками	средний или старший с выпущенными в серию изделиями (aftermarket, outdoor, крепёжные системы); листовый металл и пластик	постоянный при потоке аксессуаров или проектный подряд на изделие; Польша, Чехия, Турция, Сербия — бюро aftermarket
Разработчик Python/OCCT	расширяет инструмент: правила, каталог разгрузок, стриминг, интеграции	средний; может вырасти из оператора	один, не сразу

Система сужает, что должен знать даже опытный конструктор: интерфейс платформы — данные, DFM — в валидаторе, цена — в контуре, библиотека даёт проверенные заготовки. Опыт тратится на концепцию и компоновку; опытный становится в разы быстрее, средний работает как опытный.

Что предлагать

Рабочее место без затрат с их стороны — стол через Guacamole, никаких лицензий и железа кроме ноутбука и проводного интернета (для страны, где SolidWorks стоит годовую зарплату — аргумент). Понятная система с правилами: продуктивен с первой недели. Рост по цифрам журнала, не по симпатии (раздел 8). Современный стек: OCCT, Python, Git, параметрика. Стабильная оплата в евро, долгосрочно, владение своим участком.

Как тестировать — самой системой, экзамен и рабочее место совпадают

Тест	Что проверяет
Реверс с ловушкой	STEP → реверс → объяснить вердикты; одна деталь — реально отклонённая порталом: найдёт ли причину и предложит ли правку, а не нажмёт кнопки
Грамотность по листу	чертёж с намеренными ошибками: отверстие угиба, нет разгрузки, нержавейка на алюминии без изолятора — сколько найдёт за 20 минут
Чтение Aufbaurichtlinien	кусочек руководства → зоны и нагрузки в паспорт JSON с указанием страниц: аккуратность, языки, первоисточник
Честность	одна задача нерешаемая по условию: скажет «не сделать, потому что...» или нарисует что-то, чтобы сдать
Git-дисциплина	изменить параметр, закоммитить с внятным сообщением, объяснить дифф
Канал и пояс	замер задержки до сервера до разговора; выше 100 мс для роли с 3D — нет
Испытательный срок	месяц на реальных деталях; оценка по цифрам журнала — тем же, что определяют рост
Конструктор аксессуаров	оплаченная задача на неделю-две с вашим боксом: два-три варианта с компромиссами (масса, цена, время установки); выбранный проходит валидатор; посчитана цена; написан шаг инструкции; использованы библиотечные детали
Разработчик	одна задача: добавить правило валидатора с тестом (например, отступ отверстия от кромки) как pull request

15с. Права на результаты и коммерческая тайна

Оговорка: не юридическая консультация; шаблон договора — у адвоката по немецкому и трансграничному праву. Каркас правильный вот такой. Половина этой системы уже построена — мы называли её защитой данных.

Юридический слой — один раз, при подключении

В Германии авторское право неотчуждаемо, но передаются исключительные права использования; изобретения — по отдельному режиму. Для внешнего подрядчика — рамочный договор, подписанный один раз: все результаты, созданные в системе, — с исключительными правами у RECADA; изобретения передаются и сообщаются; конфиденциальность; немецкое право, подсудность Аугсбург. Подпись квалифицированная электронная по eIDAS (Skribble или подобный) — работает через границу. Клик при входе как единственный договор — слабая позиция; клик как подтверждение уже подписанного — сильная.

Технический слой — подтверждение при каждом входе

Guacamole показывает условия перед сессией («работа в системе подпадает под рамочный договор от ...») и пишет в лог: кто, когда, с какого ключа принял. Доказательство, что человек знал условия в момент создания.

Происхождение результата — сильнее договора

Журнал проекта пишет автора и время каждой операции; Git — автора каждого коммита; запись сессий Guacamole — что происходило на экране. Три независимых лога: через год не нужно доказывать, кто спроектировал кронштейн. Работа физически не покидала сервер — создана в системе; спор «сделал дома, принёс потом» невозможен.

Коммерческая тайна — неожиданное следствие защиты данных

Немецкий закон о защите коммерческой тайны (GeschGehG) защищает секрет только при «надлежащих мерах по его охране». Пиксели наружу, личные ключи, запрет скачивания, запись сессий, договор при входе — это ровно те меры. Защита данных, построенная для другого, одновременно даёт правовую защиту библиотеки, паспортов и правил как коммерческой тайны. Без этих мер суд может сказать, что тайны не было.

Про «идею»

Идея сама по себе не охраняется нигде. Охраняется воплощение: чертёж и код — авторским правом, форма — промышленным образцом, механизм — патентом, остальное — как коммерческая тайна при тех самых мерах. «Подписывать идею» не получится; «всё, созданное в системе, принадлежит нам» — получится.

Порядок: рамочный договор с электронной подписью → подтверждение при каждом входе с логом → работа только в системе → результаты только в Git компании → оплата привязана к приёме. Для подрядчика в Турции или Польше адвокат добавит одну-две страницы про местное право. Доступ конструктора аксессуаров — стол с данными только его аксессуара и интерфейса, не вся библиотека; здесь Kasm уместнее Guacamole.

Дополнение к ревизии 46 · 7 сентября 2026

Монетизация: две выбранные модели. Из пяти рассмотренных оставлены две — экосистема аксессуаров и проектирование внутри системы на базе наших данных о машинах. Остальные (пакет как услуга, рабочее место с людьми для чужих компаний, плагин для поставщика) отклонены.

История ревизий (продолжение)

Рев.	Дата	Что добавлено
v46	07.09.2026	15т монетизация: экосистема аксессуаров; проектирование внутри системы на данных о машинах

15т. Монетизация: две модели

Общий принцип обеих: монетизируется не код и не данные как файлы, а доступ к системе, из которой ничего не выносится. Внешний конструктор работает внутри — пиксели наружу, права по договору при входе, происхождение в трёх логах (15с). Данные о машинах — OEM-CAD, Richtlinien, сканы — остаются на сервере; их не продают, ими дают пользоваться.

Модель А. Экосистема аксессуаров — как у Front Runner, но с открытым входом

Front Runner продаёт сотни аксессуаров под свою платформу — тент, столы, канистры, крепления — и это большая часть выручки на клиента после покупки багажника. У них аксессуары делает своя команда. У нас вход открыт: внешние конструкторы проектируют аксессуары в системе под наш интерфейс (Т-паз, airline-рейка, кронштейны — описаны как данные), валидатор проверяет совместимость, цену и производительность, мы производим через Blechcon и продаём через свой канал, конструктор получает долю с продаж.

Сторона	Что получает	Что даёт
Конструктор	рабочее место без затрат, интерфейс платформы как спецификацию, валидатор, цену в контуре, библиотеку деталей, канал продаж, долю с каждой проданной единицы	концепцию и конструкцию аксессуара; права переходят по договору
Airholder	поток аксессуаров без штата конструкторов; каталог растёт со скоростью сообщества; спрос из соцсетей (15к) закрывается быстрее	систему, производство, продажи, гарантию, долю автору
Покупатель	широкий каталог, гарантированная совместимость (валидатор), одна инструкция	—

Что нужно сверх имеющегося: спецификация интерфейса платформы как публичный документ; портал подачи с проверкой; договор с долей и переходом прав (15с); правила приёмки аксессуара — валидатор плюс физический тест; учёт продаж по аксессуару для выплат. Риск: качество и ответственность — аксессуар с именем Airholder отказал на дороге; закрывается обязательной приёмкой и испытанием до каталога, не после.

Модель Б. Проектирование внутри системы на базе наших данных о машинах

Самое ценное, что накапливается, — паспорта машин: извлечённые правила из Aufbaurichtlinien, сканы реальных крыш, зоны крепления, разброс между экземплярами, калибровки по поставщику. Продавать это как файлы нельзя: OEM-данные под NDA, а собственные сканы, отданные наружу, перестают быть активом. Но дать проектировать внутри — можно: внешний конструктор или компания получает стол в системе, видит паспорт нужной машины, строит своё изделие против наших правил и проверок, а данные не покидают сервер.

Кому	Зачем им	Модель оплаты
Строители надстроек (Aufbauerhersteller), кемперы, стеллажи в фургоны, лестничные системы, прицепы	та же физика: лист, профили, паспорт машины, Richtlinien; у них нет ни сканов, ни извлечённых правил, ни валидатора	место в системе в месяц + доступ к паспортам выбранных машин
Независимые конструкторы	проектировать под реальные машины без покупки OEM-данных и сканера	место в месяц; либо бесплатно, если результат идёт в модель А
Производители аксессуаров	проверить совместимость своего изделия с реальной крышей и с нашей платформой	за проверку или за место

Юридическая граница, которую нужно проверить до запуска: NDA с производителями обычно ограничивают использование OEM-данных своей компанией. Работа третьих лиц в нашей системе с OEM-геометрией на экране может требовать согласия производителя — даже без выгрузки. Пока согласия нет, модель Б строится на собственных данных: сканы, извлечённые правила из публично доступных Richtlinien, калибровки, библиотека. Их достаточно для

большинства задач; OEM-слой подключается по машинам, где согласие получено.

Что нужно сверх имеющегося: многопользовательский режим с очередью (15в), Kasm для изоляции чужих компаний друг от друга (15п), права по машинам в паспортах, договор доступа (15с), учёт мест. Риск: поддержка чужих пользователей ест время владельца — модель запускается только с отдельным человеком на ней и только после трёх контрольных точек из раздела о целесообразности.

Почему это защищено

Код повторяет; не повторяет данные, копившиеся годами, — паспорта с разбросом по сканам, калибровки по поставщику, ответы портала, испытания по семействам — и немецкую юрисдикцию как продукт: «данные не покидают Германию» ни Zoo, ни Onshape, ни Autodesk предложить физически не могут. Обе модели усиливают друг друга: конструкторы модели Б поставляют аксессуары в модель А, продажи модели А финансируют сбор данных для модели Б.

Порядок: сначала три контрольные точки для себя; затем модель А с двумя-тремя внешними конструкторами на одном интерфейсе платформы; модель Б — после многопользовательского режима и юридической проверки по OEM.

Дополнение к ревизии 47 · 7 сентября 2026

Модель В монетизации — открытая экосистема аксессуаров с участием производителей и покупателей. Статус: идея, конкретная форма раздела 14 «Открытая платформа сообщества».

История ревизий (продолжение)

Рев.	Дата	Что добавлено
v47	07.09.2026	15т модель В: производители аксессуаров (лент-бары, фонари) и покупатели-самоделкины; классы ответственности

15т (продолжение). Модель В: открытая экосистема — производители и покупатели

Идея. Рынок фонарей и лент-баров для внедорожников большой и фрагментированный — десятки производителей (в том числе австралийских, где эта культура сильна), и каждый ищет, куда его изделие ставить. Наша платформа с описанным интерфейсом крепления может стать для них местом, где их лампочка продаётся лучше: «совместимо с Airholder, адаптер в один клик». Это конкретная форма раздела 14 «Открытая платформа сообщества» и третий уровень к моделям А и Б.

Три уровня участников

Кто	Что делает	Что получает
Производители аксессуаров (лент-бары, фонари, держатели)	публикуют в каталог интерфейс изделия: схема отверстий, масса, габарит — три числа и картинка, не CAD. Система генерирует адаптер к Т-пазу автоматически (параметрический кронштейн «от схемы отверстий к пазу» — наш генератор гнутых деталей)	«совместимо с Airholder», продажи через наш канал и свои, партнёрская программа
Покупатели-самоделкины	вводят схему отверстий и массу своей лампочки, выбирают место на платформе, получают файл под своё производство: STL для печати (PA12, ASA), DXF для лазера в ближайшем цехе, либо заказ адаптера у нас через Blehcon; плюс шаг инструкции и вердикт валидатора	своё крепление за час вместо сверления платформы; файлы бесплатно с покупкой багажника или за небольшую плату
Внешние конструкторы	модель А без изменений	доля с продаж

Чего нет ни у кого — проверка перед скачиванием

Не «скачай STL», а валидатор, который знает массу аксессуара, материал адаптера и место на платформе: печатный пластик держит фонарь на 400 г и не держит канистру на 20 кг — система говорит это, а не человек догадывается. Отсюда классы ответственности:

Класс	Кто отвечает	Ограничения
Сертифицирован	Airholder — наше, испытано	без ограничений в пределах паспорта
Партнёрское	производитель аксессуара за своё изделие, мы — за адаптер	адаптер прошёл валидатор и приёмку
Самоделное	покупатель; подписанный отказ от претензий при скачивании	только лёгкие и не влияющие на безопасность; жёсткий предел массы в валидаторе; визуально и юридически отделено от «Airholder»

Экономика

Партнёры платят за место в каталоге и совместную маркировку либо дают долю. Покупатели получают файлы с покупкой багажника — удержание и повод не уходить к Front Runner — либо за небольшую плату; заказ адаптера через нас — продажа. Побочный эффект: каждая введенная схема отверстий — новая запись в каталоге аксессуаров, сообщество наполняет базу; спрос из соцсетей (15к) закрывается самими пользователями.

Что есть и чего не хватает

Есть: генератор гнутых деталей, интерфейс платформы как данные, валидатор с массой и материалом, каталог объектов, инструкция как артефакт. Не хватает: генератор адаптеров как семейства (схема отверстий → кронштейн к пазу с параметрами смещения и угла), веб-форма ввода интерфейса, классы ответственности в валидаторе, проверка данных от сообщества перед попаданием в общий каталог.

Риски: ответственность (закрывается классами, пределом в валидаторе и отказом при скачивании); размытие бренда (самоделное отделено); качество данных сообщества (проверка перед каталогом). Порядок: после моделей А и Б, начиная с двух-трёх производителей фонарей как партнёров.

Дополнение к ревизии 48 · 7 сентября 2026

Модель В: четвёртый уровень участников — дилеры и установщики как B2B-канал.

История ревизий (продолжение)

Рев.	Дата	Что добавлено
v48	07.09.2026	15т модель В: дилеры и установщики (солнечные панели, LED-бары) — B2B у прилавка

15т (продолжение). Модель В, четвёртый уровень: дилеры и установщики

Между производителем панели и конечным покупателем стоит посредник: мелкий дилер, мастерская, магазин экипировки для внедорожников. Он продаёт солнечные панели и LED-бары и ставит их клиенту на крышу. У него та же боль, что у самоделкина, но умноженная на поток клиентов: «на этот багажник встанет? чем крепить? сколько займёт?» — и ни CAD, ни конструктора, ни времени разбираться. Это B2B, но другой: не проектирование, а сервис у прилавка.

Что получает дилер

Шаг у прилавка	Что даёт система
Клиент с багажником Airholder хочет панель	выбор багажника по серийнику или модели → каталог совместимых панелей и баров с классом (сертифицировано / партнёрское)
Панель не из каталога	ввод схемы отверстий и массы → адаптер генерируется, валидатор даёт вердикт по массе, месту, высоте для паркинга, центру тяжести
Цена и срок	адаптер: заказ у нас через Blechcon или файл под свой лазер; цена в контуре; время монтажа из графа связей
Монтаж	инструкция именно этой пары «багажник + аксессуар»: шаг, крепёж, момент затяжки, положение на платформе с учётом остальных аксессуаров клиента
После	конфигурация записана к серийнику клиента: следующий аксессуар проверяется против уже установленных; рекламация ведёт к точной конфигурации (15к)

Почему дилеру это выгодно

Продажа установки за час вместо «подумайте и приходите»; меньше возвратов из-за несовместимости; аргумент «проверено системой Airholder» вместо «должно подойти»; каталог партнёрских панелей и баров как готовый ассортимент. Для мастерской, которая ставит по десять багажников в месяц, это разница между ремеслом и процессом.

Почему это выгодно нам

Дилерская сеть продаёт аксессуары и адаптеры за нас; каждая установка — запись к серийнику, то есть полевые данные и рост каталога; производители панелей идут в партнёрскую программу, потому что за ней стоит сеть точек установки, а не один сайт. Модель оплаты: место дилера в системе в месяц либо маржа на адаптерах и партнёрских аксессуарах; для дилеров, продающих багажники Airholder, — бесплатно как часть дилерского пакета.

Что нужно сверх модели В

Учётная запись дилера с привязкой к серийникам клиентов; упрощённый интерфейс без 3D-редактирования — выбор, ввод трёх чисел, вердикт, документы; печать инструкции и этикетки с QR на месте; расчёт времени монтажа для счёта клиенту. Всё это надстройка над валидатором и генератором адаптеров, не новая геометрия.

Границы: дилер ставит только классы «сертифицировано» и «партнёрское»; «самодельное» — вне дилерского канала, чтобы ответственность мастерской и Airholder оставалась внутри проверенного. Порядок: после запуска модели В с производителями, начиная с двух-трёх мастерских, которые уже продают Airholder.

Дополнение к ревизии 49 · 7 сентября 2026

Программа «Airholder Ready» — лицензируемый стандарт интерфейса с маркой, по образцу «Made for iPhone». Из семи рассмотренных идей записана одна.

История ревизий (продолжение)

Рев.	Дата	Что добавлено
v49	07.09.2026	15у программа «Airholder Ready»: стандарт интерфейса, марка, уровни, экономика, границы

15y. Программа «Airholder Ready»

Обобщение моделей А, Б и В в одну конструкцию: не каталог и не сервис, а лицензируемый стандарт интерфейса крепления с маркой. Образец — программа Apple «Made for iPhone» (MFi): Apple не производит почти ничего из аксессуаров, но владеет стандартом разъёма, проверяет соответствие и даёт знак. Экосистема из тысяч производителей строится вокруг спецификации, а не вокруг фабрики.

Что лицензируется

Интерфейс платформы как документ: сечение профиля, шаг и геометрия Т-паза, допустимый крепёж и сухари, зоны и допустимые нагрузки на точку, высотные ограничения, требования к гальванической изоляции, классы масс. У нас он уже существует как данные валидатора (15e, 15з); для программы он оформляется как публичная спецификация с версией. Плюс сам знак — зарегистрированная марка «Airholder Ready».

Уровни участия

Уровень	Кто	Что проходит	Что получает
Compatible	производитель заявляет совместимость сам	проверку интерфейса валидатором по трём числам: схема отверстий, масса, габарит	запись в каталоге, адаптер из генератора
Ready	производитель проходит приёмку у нас	валидатор + физическая примерка на платформе + проверка инструкции монтажа	знак на упаковку и сайт, место в каталоге дилеров (15т, уровень 4), совместная маркировка
Certified	изделия с нагрузкой на безопасность: тенты, лестницы, крупные панели	всё выше + испытание по семейству (15o) с расчётом; при наличии — знак «geprüft»	право продаваться через сертифицированных установщиков и корпоративным паркам

Экономика

Производителю знак стоит денег — годовой взнос по уровню плюс сбор за приёмку каждого изделия; нам он не стоит почти ничего, потому что приёмка — это валидатор и один физический тест, а не проектирование. Главный приз — тенты: самый дорогой аксессуар на крыше, и их производители ищут платформы для совместимости. Дальше — маркизы, лестницы, души, панели, LED-бары. Второй доход — продажи адаптеров и партнёрских изделий через дилерскую сеть. Третий, неявный — каждый участник программы становится каналом продаж багажника: «под наш тент нужна платформа Airholder Ready».

Почему это работает именно с нашей системой

MFi держится на том, что соответствие проверяется, а не декларируется. У нас проверка — валидатор с массой, местом, высотой, центром тяжести, гальваникой; приёмка адаптера тремя критериями; инструкция как артефакт для каждой пары «платформа + аксессуар». Конкурент может напечатать знак, но не может за ним поставить систему проверки. И интерфейс стабилен по построению: версионизируется, изменения обратно совместимы — иначе программа теряет смысл.

Что нужно

Публичная спецификация интерфейса с версией и лицензией на использование; регистрация марки в DPMA и EUIPO; договор участника с уровнями, взносами и ограничением ответственности (15с); портал подачи и приёмки — надстройка над валидатором; регламент физической примерки; каталог с классами для дилеров; правила использования знака. Юридически: ответственность за изделие остаётся у производителя, за адаптер и совместимость — у нас, и это разделение прописано в договоре.

Границы: программа не открывается, пока интерфейс платформы не зафиксирован на несколько лет — смена сечения профиля обесценит знак у всех участников. Порядок: после модели В с двумя-тремя производителями фонарей как пилотами уровня Ready; первый Certified — тент.

Дополнение к ревизии 50 · 9 сентября 2026

Скорость доставки, а не скорость кода: как измерить у себя и как уменьшить итерации в проектировании.

История ревизий (продолжение)

Рев.	Дата	Что добавлено
v50	09.09.2026	15ф поток вместо кодинга: методика измерения на Ranger; четыре механизма уменьшения итераций; решения до первой линии

15ф. Поток вместо кодинга: измерить и уменьшить итерации

Исследование DX (сентябрь 2026, 500+ команд): ИИ пишет больше половины кода и экономит часы, но фиши не выходят раньше — кодинг не был узким местом; узкое место — согласования, ревью, ожидание, переделки. У нас это видно изнутри: ядро реверса за два дня, а тормозили ожидание сборки Ranger, ответы портала, решения по модели данных, перенос файлов. И побочка та же: три ошибки метрологии, написанные быстро и найденные реальностью. Раздел «Почему так долго» это уже фиксирует; здесь — как измерить и что делать.

Методика измерения — программа Ranger как пилот

Ворота с временными метками: данные о машине получены → паспорт готов → первый STEP кронштейна → прошёл три критерия → загружен на портал → ответ портала → заказ → деталь в руках → испытана → в магазине. Журнал проекта пишет метки для операций внутри системы; для внешних ожиданий — одна ручная строка («отправлено в Blechcon», «получен ответ»). На каждом этапе две цифры: время работы и время ожидания; на всю программу — доля работы в общем сроке (в типичной разработке 10–20 %).

Прогноз, записанный до измерения: время в инструменте — малая доля; основное — ответы портала, ожидание данных, решения, срок изготовления. Если подтвердится — ускорять надо не реверс, а эти места. Для сравнения восстановить Defender по почте и файлам: разница с Ranger — ответ на вопрос о целесообразности, измеренный по одной методике. Для самого инструмента: изменений в неделю и сколько пережили регрессию по библиотеке (просмотрщик переделан шесть раз за два дня).

Четыре механизма уменьшения итераций

Механизм	Как работает	Метрика
1. Сдвиг проверок влево	итерация через портал — день, та же проверка в валидаторе — секунда; каждый ответ «не распознано» становится правилом (сплайн в зоне гиба, разгрузка не по типу, толщина нестрогая); через двадцать деталей валидатор знает отказ раньше портала	доля деталей, прошедших портал с первого раза: сейчас 2 из 4, цель 9 из 10
2. Предугадывание из журнала	какие параметры меняются чаще всего после первой сборки (высота, положение, шаг поперечин) — становятся параметрами первого уровня, неизменяемые фиксируются; цепочки операций (после «поднять» в 90 % — «зазор» и «инструкция») система предлагает или выполняет как макрос	доля изменений, покрытых макросами
3. Варианты заранее, не по одному	ночной прогон (15о): высота 20/30/40, ширина полки — утром таблица с массой, ценой, вердиктами; решение — выбор из готового; на портал пачкой — параллельная разведка вместо последовательных итераций	число операций на деталь до «годен»
4. Запас там, где изменение придёт снаружи	разброс между машинами по сканам задаёт диапазон регулировки паза; правило «регулировка $\geq 2 \times$ разброс» (15и) — предугадывание конструкцией, а не переделкой	полевых «не встало» на серию

Решения до первой линии — самое дешёвое

Больше всего переделок даёт «а мы передумали» по решениям, которые надо было принять до геометрии: точки крепления, интерфейс, высота над крышей, длина и ширина, машина и её вариант. Список из пяти пунктов, подписанных до того, как открыт FreeCAD. Изменение любого после — сознательный акт с ценой, которую показывает система (цена в контуре, 15о), а не случайность.

Все метрики считаются из журнала, который уже есть: доля первого прохода портала, операций на деталь до «годен», доля изменений в макросах, работа против ожидания по воротам. Ничего нового собирать не нужно — нужно начать смотреть.