

# Настольная действующая модель «Шагающего замка» на SG90 + ESP32

**Основа:** концепт 1, схема В: купол на 4 ногах, ноги на общей подвижной раме, центральная плита с поворотом. Из всех вариантов эта схема требует меньше всего приводов. **Масштаб:** 1:32. **Приводов:** 7 × SG90 (4 подъёма ног, 1 челнок, 1 поворот, 1 ножничная лестница). **Масса:** ≈521 г. **Габарит:** Ø206 × 190 мм. **Скорость:** шаг 24 мм за ≈4 с (≈6 мм/с).

Все цифры взяты из `cad/mass.json` (массы и ЦТ посчитаны по объёмам деталей FreeCAD) и `calc/results.json`. Модель физически ещё не собиралась: зазоры, трение и реальный момент конкретных SG90 нужно проверить на первом экземпляре (раздел 12).



## 1. Итог

| Параметр | Значение                                                                                                                   |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Прототип | Концепт 1, схема В: купол Ø6,0 м, платформа Ø6,6 м, ноги ±1,9 × ±2,0 м, шаг 600, подъём 300                                |
| Масштаб  | <b>1:32:</b> купол Ø187,5 мм, платформа Ø206 мм (влезает на стол 220×220), ноги ±59 × ±62 мм                               |
| Высота   | 190 мм на ногах. Низ настила 77 мм на ногах и 72 мм на плите                                                               |
| Масса    | ≈ <b>521 г</b> . Корпус с плитой 407 г, рама ног с ногами 115 г. Покупные: АКБ 106 г, сервы 63 г, стержни 28 г, ESP32 10 г |

| Параметр                                   | Значение                                                                                                                                                    |
|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Приводы                                    | <b>7 × SG90</b> : 4 подъёма (кривошип r 7,5 + тяга 22 → ползун), 1 челнок (шестерня m1 z20 + рейка, ход ±12 мм), 1 поворот плиты (±25° за цикл), 1 лестница |
| Запасы по моменту (к длительным 0,7 кг·см) | подъём <b>2,5×</b> (в худшем случае на 2 диагональные ноги, с динамикой ×1,3), удержание стоя 16×, челнок 3,4×, поворот 2,8×, лестница 5×                   |
| Устойчивость                               | на ногах ≥46 мм / ≥33°, на плите ≥25 мм / ≥20,6°                                                                                                            |
| Питание                                    | 2S Li-ion 18650 → DC-DC 5 В 5 А → шина серво + VIN ESP32. Пик ≈3 А, около 3 ч работы                                                                        |
| Управление                                 | ESP32: Wi-Fi-точка с веб-пультом + команды по USB-Serial. Плавные профили, калибровка в NVS, блокировки                                                     |
| Печать                                     | 19 видов деталей, все ≤206 мм. Около 310 г филамента (PETG + PLA), без поддержек, кроме крышки купола                                                       |

## 2. Почему схема В и 7 сервоприводов

- **Схема В** (4 ноги на одной раме + центральная плита) ходит четырьмя синхронными подъёмами и одним челноком. В любой момент модель стоит **либо на 4 стопах, либо на плите**, и в обеих позах устойчива. Задачу трёх опор, как в схеме А, решать не нужно.
- **Схема А** (своя пара приводов у каждой ноги) потребовала бы 8 SG90 и имела бы маленький запас на трёх ногах: 113 мм в натуре, то есть ≈3,5 мм в модели. На столе такой запас съедается люфтами.
- **Поворот** — одна серва в колонне: на плите она поворачивает корпус относительно плиты.
- **Лестница** — седьмая серва: это требование Пабло.

## 3. Выбор масштаба по SG90

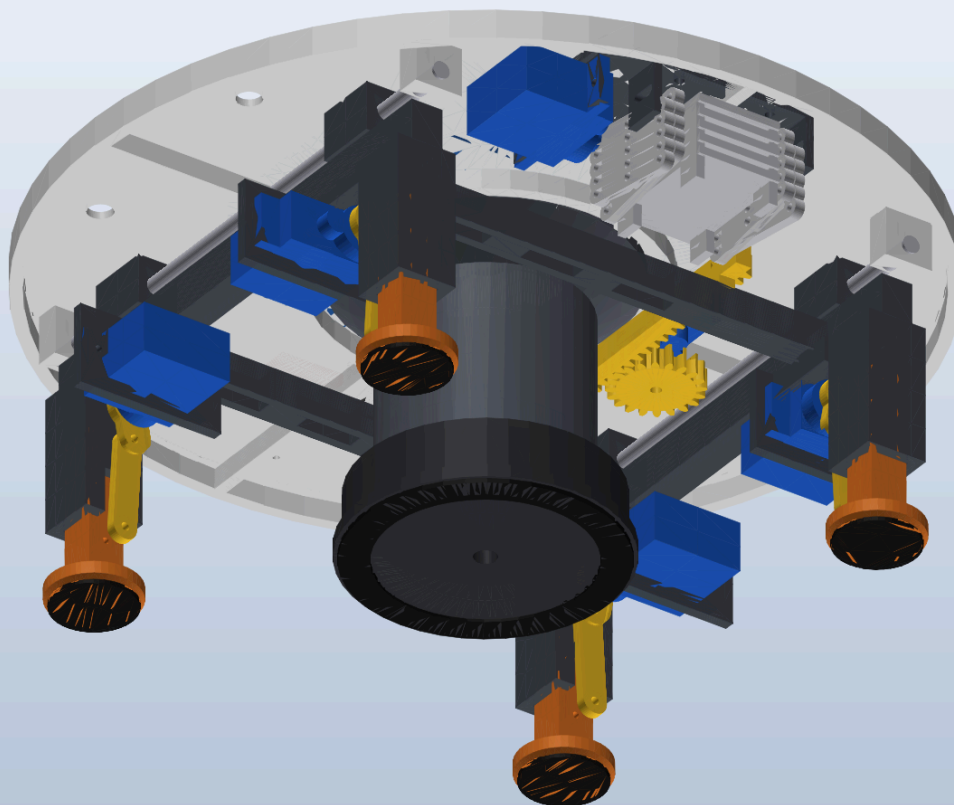
| Масштаб     | Купол / платформа     | Масса (оценка)                             | Момент подъёма    | Печать                                                |
|-------------|-----------------------|--------------------------------------------|-------------------|-------------------------------------------------------|
| 1:25        | 240 / 264 мм          | ≈750 г                                     | запас ≈1,7×       | платформа не помещается на 220×220                    |
| <b>1:32</b> | <b>187,5 / 206 мм</b> | <b>521 г (CAD)</b>                         | <b>запас 2,5×</b> | <b>всё помещается</b>                                 |
| 1:40        | 150 / 165 мм          | ≈420 г (АКБ, сервы и ESP32 не уменьшаются) | запас ≈3×         | внутри купола не хватает места для 2×18650 и разводки |

SG90 развивает 1,8 кг·см в стопоре при 4,8 В, а длительно реально 0,6–0,8 кг·см. Масштаб 1:32 — максимальный, при котором платформа печатается одной деталью, а у подъёма остаётся запас больше 2 даже в худшем случае.

**Что сознательно отличается от строгого масштаба:** \* Шаг 24 мм вместо 18,75: чтобы ход было видно. \* Подъём 11 мм вместо 9,4. \* Колонна Ø48 вместо 13: внутри стоит серва поворота. \* Плита Ø66 вместо 62,5.

## 4. Устройство

Вид снизу: рама ног, рейка челнока, колонна с плитой, лестница



Синие — SG90; жёлтое — кривошипы, тяги, рейка и шестерня; стержни Ø4 — направляющие рамы ног (втулки в раме)

### Корпус (неподвижная часть)

- **Платформа Ø206.** Настил 1,6 мм, обод, кольцо и 4 спицы снизу. На 4 стойках запрессованы стальные стержни Ø4×144: это направляющие рамы ног. Снизу крепится колонна (4 × M3). Сквозь настил проходит серва челнока: корпус сверху, вал вниз.
- **Купол** — геодезический 3V 5/8, оболочка 0,8 мм, проёмы остекления ±65° как у концепта 1. Состоит из двух частей:
  - нижняя часть с фланцем крепится 4 саморезами M2;
- **съёмная крышка** выше 0,62R (Ø142 мм) садится на центрирующий буртик с зазором 0,3. Через неё доступ к электронике.
- **Электроника на настиле:** держатель 2×18650 с BMS, лоток с ESP32, DC-DC, конденсатор и выключатель.

### Рама ног (подвижная, ход ±12 мм)

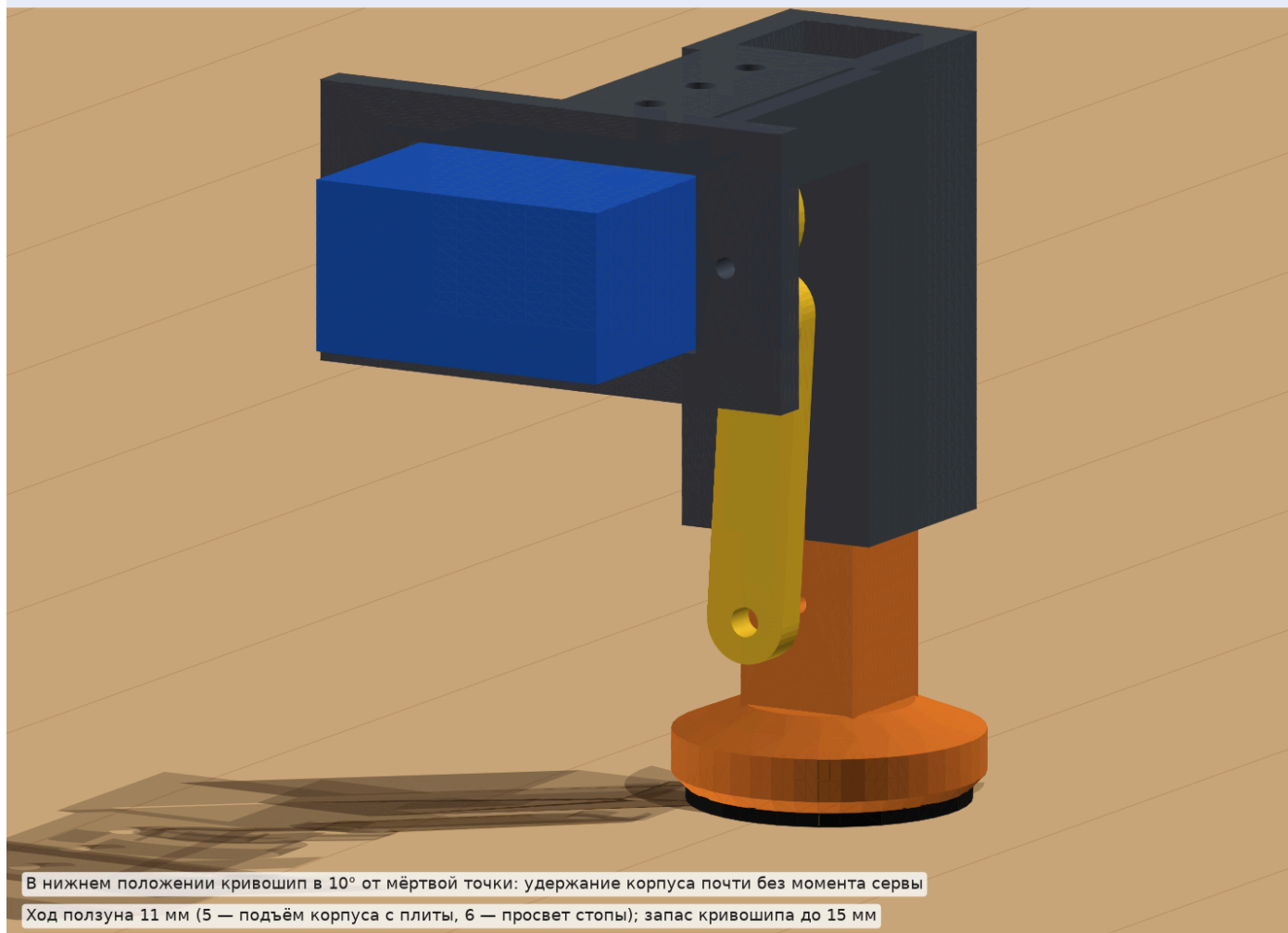
- Рама 133×134 мм: 2 продольные и 2 поперечные балки, 4 втулки Ø4,6 скользят по стержням (вариант — LM4UU). На поперечинах закреплена рейка m1 длиной 104 мм.
- **4 модуля ноги.** Каждый — направляющая 15×15 с квадратным ползуном 9×9 и стопой Ø22 с накладкой из TPU. Серва SG90 стоит вдоль оси X. Привод: кривошип r 7,5 → тяга 22 → палец ползуна (кривошипно-ползунный механизм).
- **Положения кривошипа** (угол от нижней мёртвой точки):

| Положение | Угол |
|-----------|------|
| стоя      | 10°  |

| Положение                       | Угол |
|---------------------------------|------|
| стопы касаются, корпус на плите | 63°  |
| стопы подняты на 6 мм           | 109° |

Полный поворот сервы — 99°.

**Модуль ноги: SG90 → кривошип r 7,5 → тяга 22 → ползун 9×9 в направляющей**



В нижнем положении кривошип в 10° от мёртвой точки: удержание корпуса почти без момента сервы

Ход ползуна 11 мм (5 — подъём корпуса с плиты, 6 — просвет стопы); запас кривошипа до 15 мм

## Плита и поворот

- **Колонна** — труба Ø48,2/45 с полкой под фланец SG90 (вал вниз).
- **Плита Ø66** с гнездом под крестовую качалку. Осевой люфт 1 мм, поэтому серва не несёт вес. Нагрузка идёт через упорный торец: фланец колонны лежит на ступице плиты, трение со смазкой.
- Когда корпус поднят на ноги, плита висит на **разрезном фиксаторе** (2 полукольца, 3 × M2).
- Снизу на плите — **резиновое кольцо**: оно держит плиту от проворота при повороте корпуса.

## Ножничная лестница (пантограф)

- 5 ячеек × 2 стороны, звенья 24 мм. Ступени висят на двух шарнирах одного уровня, один из которых в пазу, поэтому они **всегда горизонтальны**.
- **Привод**: верхний шарнир А сидит прямо на валу SG90 (ведущее звено с гнездом качалки), шарнир В скользит в пазу кронштейна.
- **Положения**:

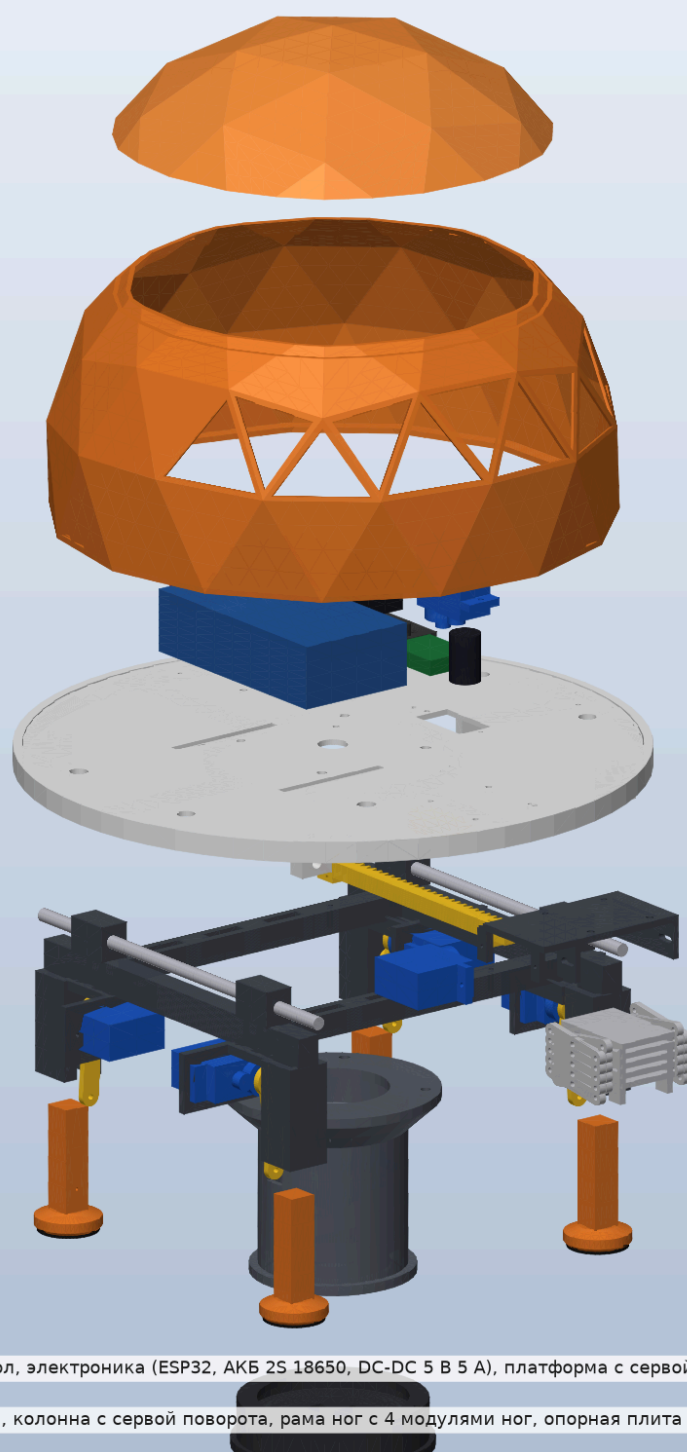
| Положение | Угол $\alpha$ | Высота                        | Ширина                          |
|-----------|---------------|-------------------------------|---------------------------------|
| сложена   | 8°            | 16,7 мм                       | 23,8 мм (под настилом, впереди) |
| выдвинута | 31,7°         | 63 мм (до стола, поза «сидя») | —                               |

Поворот сервы — всего 24°.

#### Стоянка на плите: ножничная лестница выдвинута сервой до стола



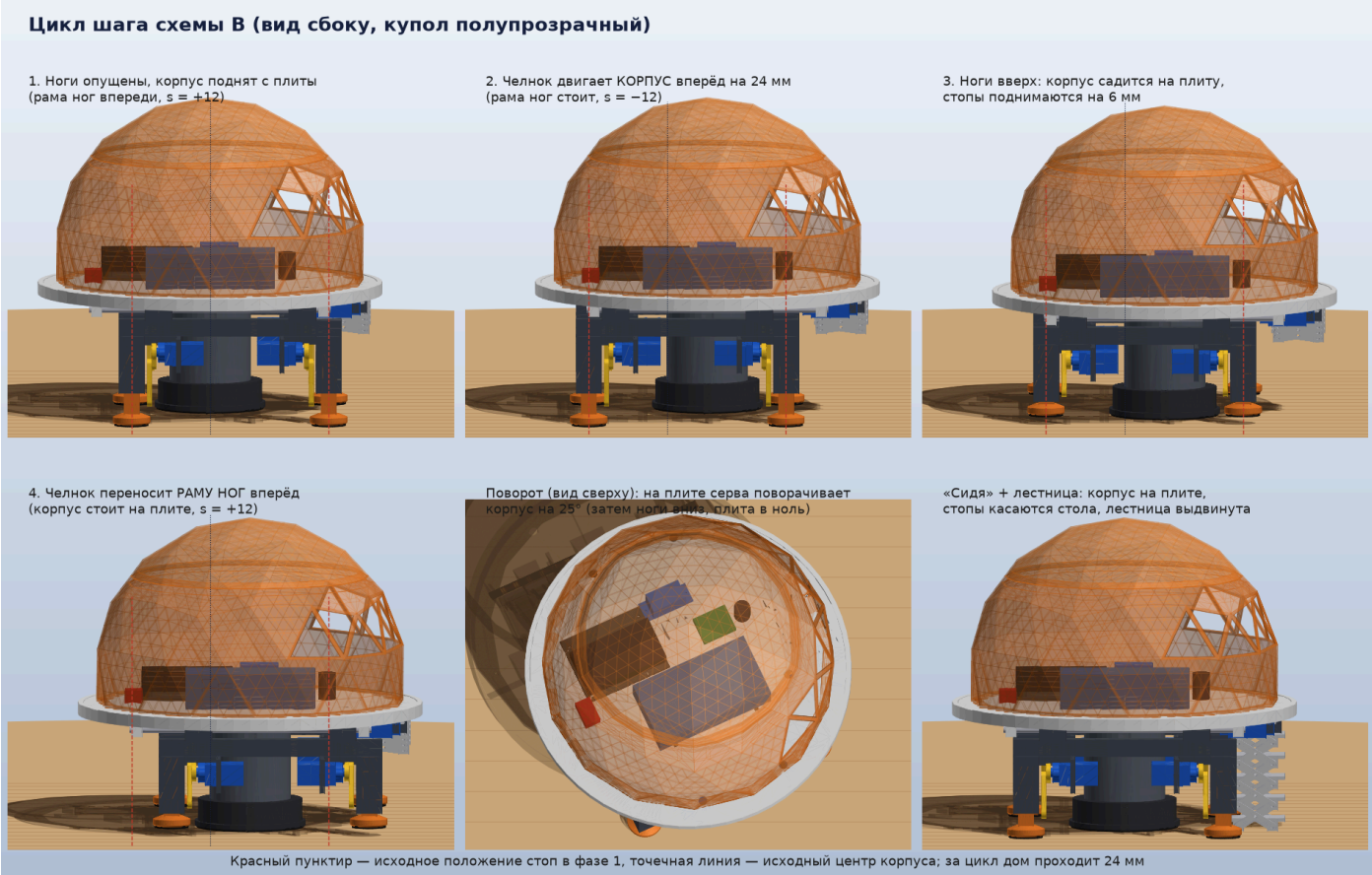
## Разнесённый вид сборки



Сверху вниз: крышка купола, купол, электроника (ESP32, АКБ 2S 18650, DC-DC 5 В 5 А), платформа с сервой челнока,

кронштейн и ножничная лестница, колонна с сервой поворота, рама ног с 4 модулями ног, опорная плита с фиксатором

## 5. Походка, поворот, лестница



Цикл «вперёд» ( $s$  — положение рамы ног относительно корпуса). Итого  $\approx 4,0$  с на 24 мм  $\approx 6$  мм/с (0,36 м/мин).

| Фаза | Действие                                                                                                            | Опора   | Время, с        |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|-----------------|
| 1    | Ноги вниз ( $\phi\ 109^\circ \rightarrow 10^\circ$ ): стопы встают на стол, корпус поднимается на 5 мм, плита висит | 4 стопы | 0,95            |
| 2    | Челнок $s\ +12 \rightarrow -12$ : <b>корпус</b> едет вперёд на 24 мм                                                | 4 стопы | 1,0             |
| 3    | Ноги вверх: корпус садится на плиту, стопы поднимаются на 6 мм                                                      | плита   | 0,6             |
| 4    | Челнок $s\ -12 \rightarrow +12$ : <b>рама ног</b> переносится вперёд                                                | плита   | 0,8             |
|      | Паузы между фазами                                                                                                  |         | $4 \times 0,15$ |

Назад — тот же цикл в обратном порядке.

Поворот ( $25^\circ$  за цикл, можно до  $\pm 60^\circ$ ): 1. Корпус на плите, ноги подняты. Серва в колонне поворачивает корпус относительно стоящей плиты. 2. Ноги вниз: корпус поднимается вместе с плитой. 3. Серва возвращает плиту в ноль (плита в воздухе). 4. Ноги вверх.

Лестница: \* Команда `stair_down` выполняется только из позы «сидя» (корпус на плите, стопы на столе) и только без движения. \* Пока лестница не убрана, команды `forward/back/left/right/stand` блокируются.

## 6. Расчёт моментов и трения (calc/calc.py)

SG90: длительно 0,7 кг·см (0,069 Н·м), стопор 1,8 кг·см.

| Привод                                                | Нагрузка                                                                                                                      | Момент                | Запас (длит. / стопор) |
|-------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|------------------------|
| Подъём ноги, худший случай                            | 505 г поднимаемой массы на 4 ноги; ×2 (несут 2 диагональные ноги) ×1,3 (динамика) = 3,2 Н на ползун; плечо до 7,8 мм; КПД 0,9 | <b>0,28<br/>кг·см</b> | <b>2,5× / 6,3×</b>     |
| Подъём, номинал (поровну на 4)                        | 1,24 Н                                                                                                                        | 0,11<br>кг·см         | 6,4×                   |
| Удержание стоя ( $\varphi = 10^\circ$ , плечо 1,7 мм) | 2,5 Н                                                                                                                         | 0,044<br>кг·см        | 16×                    |
| Челнок, фаза 2 (корпус по стержням)                   | 378 г, $\mu = 0,35$ (PETG по стали всухую), перекося ×1,3, разгон                                                             | <b>0,21<br/>кг·см</b> | <b>3,4×</b>            |
| Челнок, фаза 4 (рама висит)                           | 115 г                                                                                                                         | 0,06<br>кг·см         | 11×                    |
| Поворот на плите                                      | упорный торец г 7...27 ( $r_{\text{ср}}$ 19 мм), $\mu = 0,25$ , вес 492 г + инерция                                           | <b>0,25<br/>кг·см</b> | <b>2,8×</b>            |
| Лестница                                              | 16 г, худший угол $8^\circ$ , ×1,5 на трение в 30 шарнирах                                                                    | 0,14<br>кг·см         | 5×                     |

**Проверки на проскальзывание:** \* Фаза 2: челнок толкает с силой 1,7 Н, стопы держат до 2,6 Н при  $\mu$  0,5 (TPU по столу). \* Фаза 4: усилие 0,5 Н, плита держит до 2,2 Н. \* Поворот: резиновое кольцо держит плиту с запасом 3,6×. Без резины (PETG по столу) запас всего  $\approx 1,2$ .

**Разрешение:** зона нечувствительности SG90  $\approx 1^\circ$ . Это 0,03 мм подъёма у нижней мёртвой точки и 0,17 мм хода челнока.

## 7. Устойчивость

| Поза                    | Опора           | Запас ЦТ до края | Угол опрокидывания        |
|-------------------------|-----------------|------------------|---------------------------|
| Фаза 1 (рама впереди)   | 4 стопы         | 53 мм            | $36,6^\circ$              |
| Фаза 2 (корпус впереди) | 4 стопы         | 46 мм            | $32,8^\circ$              |
| Фазы 3–4                | плита Ø64       | 25–29 мм         | $20,6\text{--}23,5^\circ$ |
| Поворот / «сидя»        | плита (+ стопы) | 27,5 мм          | $22^\circ$                |

- ЦТ на ногах — на высоте 72 мм. Батарея сдвинута на  $Y \approx -20$ , чтобы ЦТ был у оси.
- Ускорения челнока  $\approx 0,1 \text{ м/с}^2$ ; их влияние на ЦТ пренебрежимо.
- На наклонном столе (до  $10^\circ$ ) и на ткани модель устойчива, но на ткани хуже сцепление.

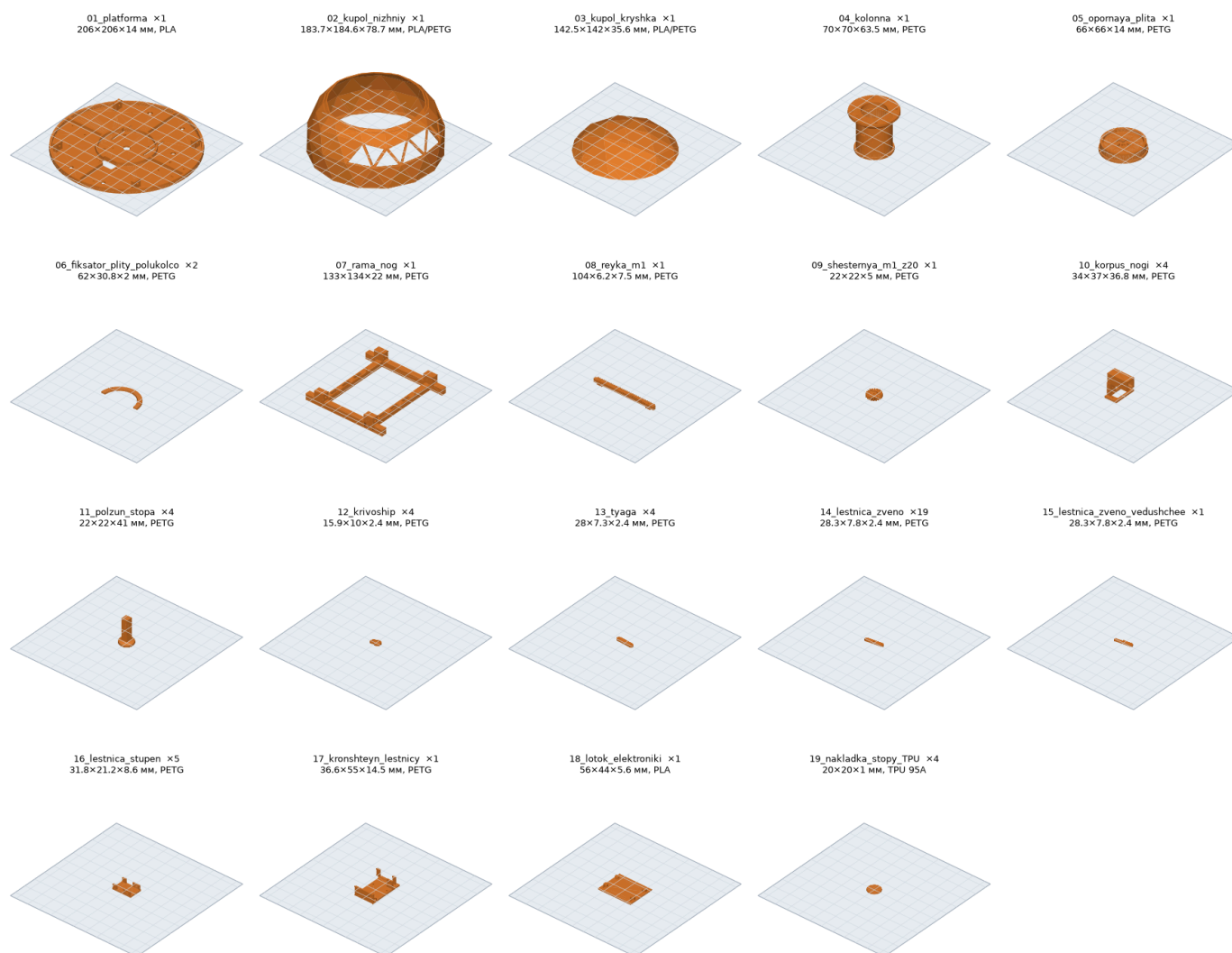
- **Сборка:** Arduino IDE 2.x или arduino-cli, ядро **esp32 3.x**, библиотека **ESP32Servo**, плата «ESP32 Dev Module». Скетч **скомпилирован** arduino-cli (esp32:esp32 3.3.12, ESP32Servo 3.2.1): 967 КБ (73% флеша), 49 КБ ОЗУ.
- **Управление:**

- Wi-Fi-точка WalkingCastle / castle123 → <http://192.168.4.1>: кнопки, ползунок скорости, калибровка, статус в JSON.
- Те же команды — через монитор порта 115200.
- **Команды:**
  - движение: forward [N], back [N] (0 — до stop), left, right, stop;
  - позы: stand, sit, rest;
  - лестница: stair\_down, stair\_up;
  - настройка: speed 0.3...2, cal <0..6> <±град>, save, center, status.
- **Машина состояний:** очередь фаз (ноги / челнок / поворот / лестница / пауза), косинусный профиль скорости. stop выполняется в конце текущего цикла, поэтому модель всегда останавливается в устойчивой позе.
- **Блокировки:**
  - ходьба при выдвинутой лестнице;
  - лестница вне позы «сидя» или во время движения;
  - АКБ ниже 6,4 В → stop + sit.
- **Пересчёт в углы сервы:**
  - подъём:  $90^\circ \leftrightarrow \varphi 60^\circ$ ; на правых ногах знак обратный;
  - челнок:  $5,73^\circ/\text{мм}$ ;
  - лестница:  $90^\circ \leftrightarrow \alpha 20^\circ$ .
- Калибровочные смещения хранятся в NVS (Preferences).

## 10. Печать

| Деталь                                | Шт.    | Материал   | Ориентация / настройки                                                           |
|---------------------------------------|--------|------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| 01 платформа Ø206                     | 1      | PLA        | настилом вниз; 3 стенки, 20% gyroid; <b>без юбки и кайм</b> (стол 220)           |
| 02 купол, нижняя часть Ø184           | 1      | PLA / PETG | основанием вниз; стенка 0,8 мм (2 периметра 0,4), без заполнения и без поддержек |
| 03 крышка купола Ø142                 | 1      | PLA / PETG | срезом вниз; древовидные поддержки только от стола                               |
| 04 колонна                            | 1      | PETG       | фланцем вниз; 4 стенки; фаски $45^\circ$ вместо поддержек                        |
| 05 плита / 06 фиксатор (2 полукольца) | 1 / 2  | PETG       | плоско                                                                           |
| 07 рама ног 133×134                   | 1      | PETG       | балками вниз; 4 стенки, 30%                                                      |
| 08 рейка m1 / 09 шестерня m1 z20      | 1 / 1  | PETG       | плоско, слой <b>0,12</b>                                                         |
| 10 корпус ноги                        | 4      | PETG       | пластиной сервы вниз; 4 стенки, 40%                                              |
| 11 ползун со стопой                   | 4      | PETG       | стопой вниз; 100%                                                                |
| 12 кривошип / 13 тяга                 | 4 / 4  | PETG       | плоско; 100%                                                                     |
| 14 звено лестницы / 15 ведущее звено  | 19 / 1 | PETG       | плоско                                                                           |
| 16 ступень                            | 5      | PETG       | плоско                                                                           |
| 17 кронштейн лестницы                 | 1      | PETG       | пластиной вниз                                                                   |
| 18 лоток электроники                  | 1      | PLA        | плоско                                                                           |
| 19 накладка стопы                     | 4      | TPU 95A    | или резина 1 мм                                                                  |

## Детали для печати в ориентации печати на столе 220×220 (все помещаются)



**Общие настройки:** \* Сопло 0,4, слой 0,2 мм. \* Сплошной объём деталей 314 см<sup>3</sup>; с учётом заполнения ≈310 г филамента. \* Время печати ≈22–28 ч. Платформа и купол — по 5–7 ч.

**Допуски** (параметр CLR = 0,3 в kinematics.py):

| Элемент           | Размер                                        |
|-------------------|-----------------------------------------------|
| Посадки с зазором | 0,3 на сторону                                |
| Гнёзда SG90       | 22,5+0,6 × 12,2+0,6                           |
| Гнёзда качалок    | +0,3                                          |
| Под саморез M2    | Ø1,6                                          |
| Проходные M2      | Ø2,2                                          |
| M3                | Ø3,3                                          |
| Втулки рамы       | Ø4,6 — развернуть сверлом 4,5 до лёгкого хода |
| Стержни в стойках | Ø3,9, посадка с натягом                       |
| Шарниры лестницы  | Ø2,0–2,2 под пруток 1,75 или винт M2          |

Если принтер «толстит», уменьшите или увеличьте CLR и пересоберите.

## 11. Спецификация (BOM, ориентировочные цены 2026, ₽)

| Позиция                                                                 | Кол-во | Цена                             |
|-------------------------------------------------------------------------|--------|----------------------------------|
| Сервопривод SG90 (лучше брать с запасом, 1–2 шт.)                       | 7 (+1) | $8 \times 120 = 960$             |
| ESP32 DevKitC / DevKit V1 30-pin                                        | 1      | 450                              |
| DC-DC Mini-560 Pro 5 В 5 А (или XL4015)                                 | 1      | 200                              |
| Аккумулятор 18650, 2500–3000 мА·ч, 20 А (Samsung 25R / LG HG2 / аналог) | 2      | 800                              |
| Держатель 2×18650 + BMS 2S 5–8 А                                        | 1      | 150                              |
| Зарядное 2S с балансировкой (если нет)                                  | 1      | 400                              |
| Выключатель 6 А, держатель предохранителя + 5 А                         | 1      | 90                               |
| Конденсатор 1000–2200 мкФ 10 В, 100 нФ, резисторы 100k/33k, диод SS14   | —      | 50                               |
| Стержень стальной Ø4 мм × 144 (калёный / серебрянка)                    | 2      | 150                              |
| (опция) линейные подшипники LM4UU                                       | 4      | 200                              |
| Винты M2×6/8/10/12 с гайками (набор), M3×8 + гайки 4 шт.                | —      | 280                              |
| Провода 22/26 AWG, удлинители серво 15 см ×4, макетка под шину          | —      | 200                              |
| Резина 1 мм (самоклейка) под плиту и стопы                              | —      | 100                              |
| Филамент: PETG ≈200 г + PLA ≈120 г + TPU ≈2 г                           | —      | 600                              |
| <b>Итого</b>                                                            |        | <b>≈4,5–5 тыс. ₽ (≈50–60 \$)</b> |

## 12. Сборка и наладка

- Подготовка деталей.** Напечатать, снять заусенцы. \* Развернуть втулки рамы (4,5 мм), отверстия шарниров (2,0 мм) и паз ползуна. \* Ползуны должны ходить в направляющих без люфта и без заеданий. Смазать их силиконовой смазкой или PTFE-сухой.
- Электроника.** \* Выставить DC-DC на **5,1 В до подключения серв.** \* Собрать шину питания с конденсатором, подключить по схеме (раздел 8). \* Прошить ESP32 и проверить веб-страницу.
- Центровка серв.** Подключить все 7 серв без качалок и подать команду center: все сервы встанут в 90°.
- Модули ног.** \* Ползун вставить в направляющую. \* Тягу соединить с ползуном (M2×12) и кривошипом (M2×8 + гайка, шайба). \* Кривошип прикрутить к укороченной до 11 мм одноплечей качалке (2 самореза из комплекта SG90). \* Серву вставить в пластину корпуса (2 самореза из комплекта). \* Качалку посадить на шлиц так, чтобы кривошип смотрел **на 60° от вертикали вниз в сторону центра модели.** Затянуть винт качалки.
- Рама ног.** Корпуса ног прикрутить к балкам снизу (3 × M2×8 на ногу), рейку — к поперечинам (2 × M2×8).
- Направляющие.** Стержни Ø4 продеть через втулки рамы и запрессовать в стойки платформы, зафиксировать саморезами M2 сверху.
- Челнок.** \* Серву вставить в проём настила сверху валом вниз и закрепить 2 саморезами. \* Раму установить по центру ( $s = 0$ ) и посадить шестерню с крестовой качалкой в зацепление с рейкой.
- Поворот.** \* Серву вставить в колонну сверху валом вниз и закрепить 2 саморезами на полке. \* Колонну прикрутить к настилу 4 × M3. \* Крестовую качалку поставить на шлиц в 90°. Надеть плиту: качалка входит в гнездо. \* Плиту замкнуть полукольцами фиксатора (3 × M2). Смазать упорный торец.

9. **Лестница.** \* Звенья соединить осями: пруток 1,75 с оплавленными концами или M2×8 + нейлок; ступени — на нижние шарниры каждой ячейки. \* Кронштейн прикрутить 4 × M2. \* Ведущее звено посадить на качалку сервы при  $\alpha = 20^\circ$ : середина хода, команда center.
10. **Электроника и купол.**
- Лоток с ESP32 и DC-DC, держатель АКБ (стяжки через прорези), выключатель.
  - Кабели ног проложить через отверстия Ø6 с петлёй  $\pm 12$  мм.
  - Нижнюю часть купола прикрутить 4 × M2, крышку надеть на буртик.
11. **Калибровка.**
- cal i  $\pm$ град для каждой сервы;
  - sit — все 4 стопы касаются стола;
  - stand — корпус поднят на 5 мм, плита висит на 3–4 мм;
  - rest — стопы в 6 мм над столом;
  - лестница в stair\_down касается стола.
  - Проверить, что left поворачивает влево. Если нет, поменять знак DIR[S\_TURN] в скетче.
  - Сохранить: save.
12. **Первый проход.** speed 0.6, затем forward 3. Следить, чтобы стопы не проскальзывали в фазе 2, а плита — в фазе 4.
- Если серва подъёма «гудит» стоя, сместить калибровку на 1–2°.
  - В простое держать модель в sit: сервы ног разгружены.

## 13. Вариант ASV (6 ног × 2 SG90 = 12 серв) — оценка

---

- **Масса:**  $\approx 570$  г (12 серв 108 г, ноги 6 × 12 г, корпус и АКБ как здесь). На трёх ногах (походка «треножник») на ногу приходится 1,8 Н;  $\times 1,5$  неравномерность,  $\times 1,3$  динамика = 3,6 Н.
- **Момент:** при вылете стопы от «бедра»  $\approx 45$  мм нужен **1,7 кг·см**. Это в 2,4 раза больше длительного момента SG90 и почти стопор. **Не проходит.**
- **Пиковый ток** 12 × 0,7  $\approx 8,4$  А: нужны ВЕС на 8–10 А и PCA9685 (16 каналов ШИМ по I<sup>2</sup>C).
- **Что нужно, чтобы вариант заработал** (одно из):
- MG90S (2,2 кг·см, металлические шестерни) — запас  $\approx 1,3$ , на грани;
- MG996R / DS3218 и масштаб  $\approx 1:20$ , но масса около 1,5 кг;
- масштаб 1:50 (купол Ø120) с пантографной ногой ASV, где вертикальная серва работает через рычаг с выигрышем  $\approx 2-3$ .
- **Вывод:** для SG90 схема В с 7 сервами — правильный выбор. ASV-вариант имеет смысл делать на MG90S как отдельный проект.

## 14. Оговорки и риски

---

- **Не собрано и не испытано.**
- Трение ( $\mu$  втулок 0,35, торца плиты 0,25, стоп 0,5) и неравномерность нагрузки  $\times 2$  — оценки.
- Реальные SG90 сильно различаются (поддельные — 0,5 кг·см и люфт 2–3°).
- Запас подъёма 2,5× в худшем случае. Если серва не тянет: смазать, поставить MG90S (та же посадка, 13,4 г) или облегчить — 2S LiPo вместо 18650 даёт –50 г.
- **Кривошип в 10° от мёртвой точки** держит корпус почти без момента. Но если кривошип перескочит мёртвую точку (ошибка калибровки), нога «сложится». Поэтому калибровку подъёма делать по stand аккуратно.
- **Купол 0,8 мм** — декоративная оболочка: не брать модель за купол. Крышку печатать с поддержками.
- **Платформа 206 мм на столе 220** — без юбки и кайм, на клей или PEI.
- **Плита на столе:** без резины плита проворачивается при повороте. На скользком стекле или лаке модель может буксовать в фазе 2 — нужен TPU на стопах.

- **Модель быстрее «подобной» натуре.** По Фрудру натура 0,92 м/мин соответствует 0,16 м/мин в модели, а модель идёт 0,36 м/мин. Это нормально для демонстрации; скорость меняется командой `speed`.
- **При включении** сервы дёргаются в стартовую позу `sit`, поэтому модель включать, стоящей на плите.

## 15. Файлы

---

- `cad/sg90_model.py` — параметрическая модель FreeCAD 1.0 (`freecadcmd sg90_model.py`): все детали, сборка, позы, массы, проверка коллизий в 5 позах (коллизий нет). Параметры — в `cad/kinematics.py`.
- `cad/sg90_assembly.FCStd`, `cad/sg90_assembly.step` — сборка в позе «стоя». 72 тела, все тела STEP валидны.
- `stl/01...19_*.stl` — детали в ориентации печати, все замкнутые (solid, без non-manifold).
- `cad/mesh_*/` — сетки поз для рендера; `cad/render_mpl.py`, `cad/render_parts.py` — рендеры.
- `calc/calc.py` → `calc/results.json` — расчёт.
- `firmware/walking_castle_sg90/walking_castle_sg90.ino` (+ `castle_types.h`) — прошивка.
- `renders/01...08` — изометрия, вид снизу, разнесённый вид, лестница, фазы шага, узел ноги, детали на столе, схема подключения.
- `doc/wiring.py` — схема подключения; `doc/build_pdf.py` — сборка HTML/PDF из этого MD.