ПМП-5.5

Беспилотный моторный параплан на куполе Pansh Legend 5.5 м²

Расчётная записка (ориентировочный расчёт)



Ноябрь 2026. Расчёт выполнен по упрощённым инженерным методикам (теория крыла малого удлинения, импульсная теория винта, маятниковая модель подвески). Все аэродинамические коэффициенты купола приняты по аналогам и **должны быть уточнены лётными испытаниями**. Документ не является сертификационным.

Сводка ключевых величин

Параметр	Было (исходная оценка)	Расчёт	Комментарий
Взлётная масса	8–12 кг	9.3 кг	подвеска 4,1 кг + купол 0,85 + АКБ Li-ion 1,9 + нагрузка/балласт 2,5
Нагрузка на крыло	—	1.7 кг/м²	по плоской площади 5,5 м²
Скорость балансировки	6–7 м/с	6.6 м/с (24 км/ч)	сваливание ≈5.3 м/с
Аэродинамическое качество	3–4	4.3 (макс. 4.4)	оптимистично; реально 3,5–4,3
Тяга в горизонте	~3 кгс	2.15 кгс	набор 1,5 м/с — 4.3 кгс; статическая с запасом — 5.3 кгс
Электрическая мощность	300–400 Вт	348 Вт горизонт	набор 832 Вт, взлёт 894 Вт (40 А)
Время полёта, LiPo 6S 10 А·ч	30–40 мин	27 мин	с резервом 15–20 % ёмкости
Время полёта, Li-ion 6S4P P45B	—	47 мин	рекомендуемый вариант
Серво клевант	20–35 кг·см	35 кг·см, нужно 9.0	барабан Ø110, ход 181 мм, запас ×3.9
Расстояние купол–подвес	0,5–0,7 размаха	2.43 м (0,58 b)	период маятника 3.3 с
Макс. ветер	—	≤ 4.0 м/с	средний ветер, порывы ≤ 5 м/с
Стоимость комплекта	—	≈ 119 тыс. ₽	к закупке ≈ 112 тыс. ₽ (купол имеется)

Главные выводы. (1) Исходная оценка в целом подтверждается; тяги ~3 кгс хватает только для горизонта — для взлёта и набора нужно 4,5–5,5 кгс, поэтому выбран мотор класса 5015 с винтом 20″. (2) LiPo 6S 10 А·ч даёт около 27 мин, а не 30–40: для 40+ мин нужен Li-ion 6S4P (≈47 мин). (3) Купол кайтовый: без дополнительного груза он слишком «лёгкий» и медленный для ветра; нагрузка 2,5 кг (камера или балласт) нужна для скорости и проникающей способности. (4) Ход клеванты при управлении от ArduPilot (800–2200 мкс) — ≈189° у серво 270°, отсюда барабан Ø110.

1. Исходные данные и принятые допущения

Обозначение	Значение	Тип	Пояснение
S	5.5 м²	ФАКТ	площадь купола (плоская), Pansh Legend 5.5
AR_flat	3.2	ФАКТ	удлинение плоское (b²/S) — panshkite.org
b_flat	4.195 м	РАСЧЁТ	плоский размах
c_mean	1.311 м	РАСЧЁТ	средняя хорда
c0	1.55 м	ПРИНЯТО	корневая хорда (форма в плане ~эллиптическая, проверить рулеткой)
k_proj	0.89	ПРИНЯТО	отношение проекционного размаха к плоскому (арка купола)
S_proj	5.06 м²	РАСЧЁТ	проекционная площадь
AR_proj	2.755	РАСЧЁТ	проекционное удлинение
m_canopy	0.85 кг	ПРИНЯТО	масса купола (посылка 1 кг с мешком)
CD0_wing	0.06	ПРИНЯТО	профильное сопротивление купола + открытые воздухозаборники (кайтовый ram-air без оптимизации, 0.04–0.08)
e_osw	0.78	ПРИНЯТО	коэффициент Освальда для арочного крыла
L_lines	50.0 м	РАСЧЁТ	суммарная длина строп, см. стропную схему (lines.py)
d_line	1.3 мм	ПРИНЯТО	средний диаметр строп Dyneema 1.0–1.8 мм
CD_lines	0.012	РАСЧЁТ	стропы, Cd цилиндра 1.0, отнесено к S
Af_pod	0.075 м²	ПРИНЯТО	лобовая площадь подвески (без защиты винта)
CD_pod	0.014	РАСЧЁТ	подвеска Cd≈0.9 + кольцо защиты
CD0_total	0.086	РАСЧЁТ	полное вредное сопротивление
CL_trim	0.62	ПРИНЯТО	CL на балансировке после перетримовки рядов (кайтовая балансировка ~0.8–0.9)
CL_max	0.95	ПРИНЯТО	CL перед срывом (с тормозами), ram-air

Обозначение	Значение	Тип	Пояснение
alpha_trim	7.0 °	ПРИНЯТО	угол атаки на балансировке
m_payload	2.5 кг	ПРИНЯТО	полезная нагрузка (камера с подвесом) или балласт
P_avionics	12.0 Вт	ПРИНЯТО	ПК, GPS, приёмник, телеметрия, сервы в среднем

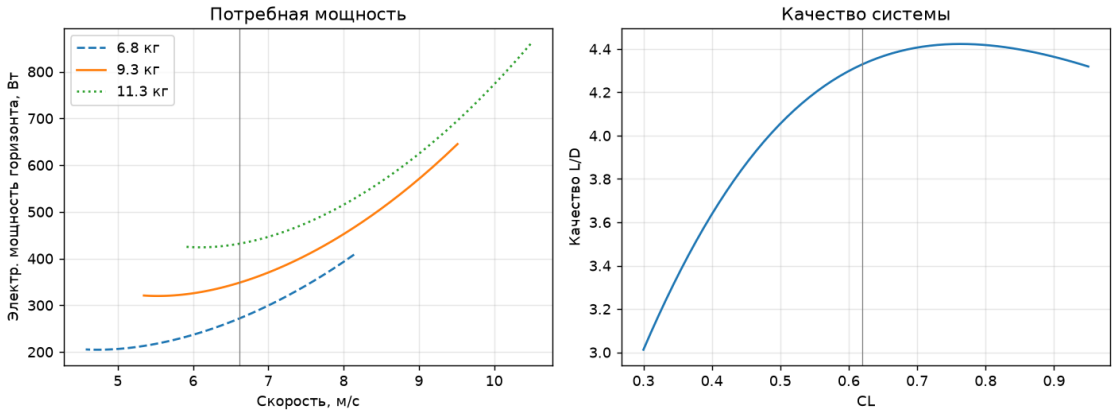
Тип: ФАКТ — паспорт купола; ПРИНЯТО — допущение по аналогам (уточнить); РАСЧЁТ — получено; ВЫБОР — проектное решение. Число секций купола (18) и корневая хорда (≈1,5 м) приняты по фотографиям и пропорциям Legend — **перед изготовлением строп снять фактические размеры и точки крепления на куполе.**

2. Нагрузка на крыло, скорость, качество

Поляра системы: $C_D = C_{D0} + C_L^2/(\pi \cdot e \cdot \lambda_{пр})$, где C_{D0} = 0.06 (купол) + 0.012 (стропы 50 м × 1.3 мм) + 0.014 (подвеска) = 0.086; e = 0.78, $\lambda_{пр}$ = 2.76.

Скорость балансировки $V = \sqrt{(2mg/(\rho \cdot S \cdot C_L))}$ при ρ = 1,225 кг/м³, C_L = 0.62: **V = 6.62 м/с**. Сваливание ($C_{L\,max}$ = 0.95) — 5.35 м/с. Качество на балансировке 4.33 (максимальное 4.42 при C_L = 0.76). Планирование без мотора: снижение 1.53 м/с, угол 13.0°, хорда купола наклонена на -6.0° к горизонту (носом вниз) — этим определяется разница длин рядов A и C.

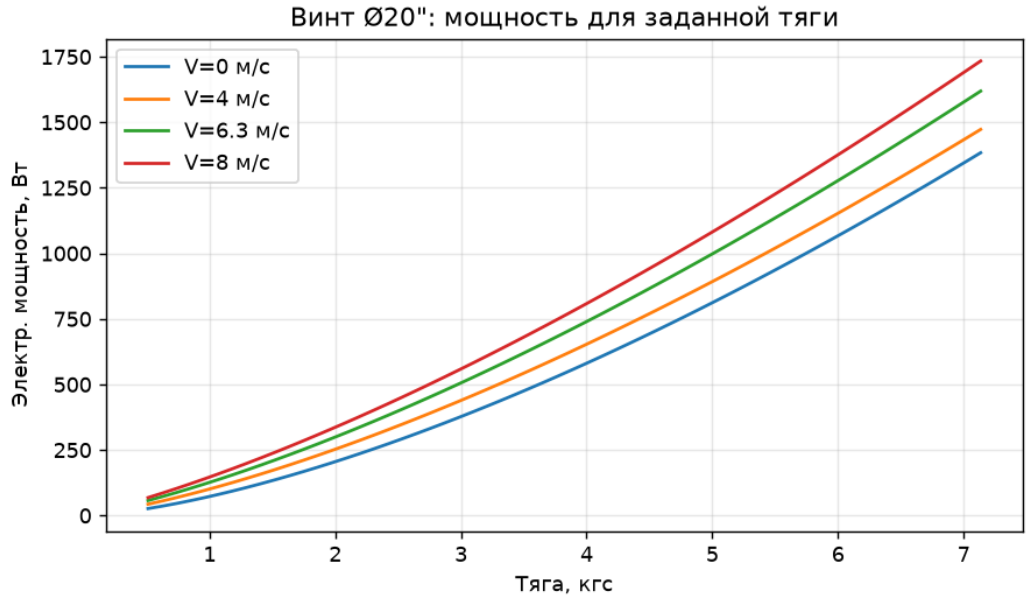
Кайтовый купол сбалансирован на большие углы атаки (C_L ≈ 0,8–0,9) и тягу. Для параплана ряды «перетримлены»: A короче C (≈90 мм), что даёт C_L ≈ 0,6 и бóльшую скорость. Если купол при испытаниях «сидит» (парашютирует) — укоротить A ещё на 20–30 мм; если складывается передняя кромка — удлинить.



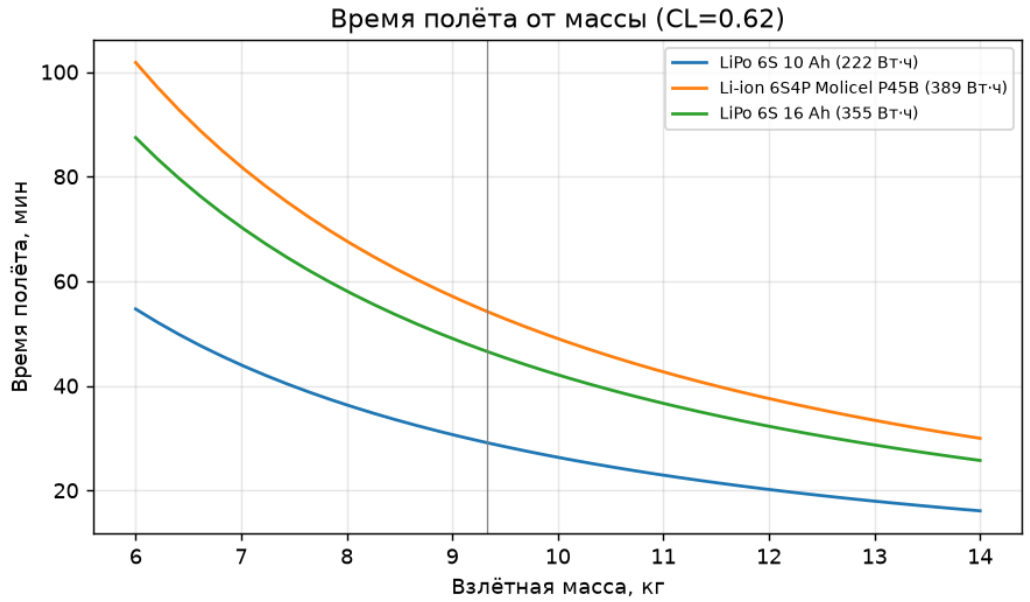
3. Потребная тяга, мощность и силовая установка

Режим	Тяга, кгс	Мощность на валу, Вт	Электрическая, Вт	Ток 6S, А
Горизонт	2.15	281.0	348.0	16.1
Набор 1,5 м/с	4.27	—	832.0	37.5
Взлёт/статика (+25 %)	5.33	746.0	894.0	40.3

Винт рассчитан по импульсной теории (FM = 0,72 в статике, $\eta_{проф}$ = 0,8), КПД мотора 0,86, регулятора 0,97. Чем больше диаметр, тем меньше мощность на ту же тягу; ограничение — габарит подвески и защитное кольцо. Выбран **винт 20×6 малошаговый** (в кольце Ø570): на малой скорости полёта 6–7 м/с большой шаг не нужен.



Узел	Выбор	Обоснование
Мотор	MAD 5015 IPE V3 KV320, 220 г	≈5700 об/мин на 6S под нагрузкой; с винтом 20×6 статическая тяга до ~7 кгс (≈1,5 кВт) — запас; рабочая точка в горизонте ≈55–60 % газа
Регулятор	Hobbywing Skywalker 80A V2	взлётный ток 40 А, пиковый 60–70 А; BEC регулятора не используется
Винт	MAD CB2 PRO 20×6 толкающий	статическая тяга 5,3 кгс при ~4800 об/мин и ~900 Вт
АКБ (осн.)	Li-ion 6S4P Molicel P45B, 18 А·ч, 389 Вт·ч, 1,9 кг	ток 4×45 А = 180 А ≫ 40–70 А; лучшая энергоёмкость
АКБ (альт.)	LiPo 6S 10–16 А·ч	легче (10 А·ч) — только 27 мин; 16 А·ч — 39 мин
Ограничение газа	THR_MAX = 90 %	ток ≤ 60 А, защита от перегрева мотора на малой скорости обдува



Вариант АКБ	Взлётная масса, кг	Скорость, м/с	Средняя мощность, Вт	Время полёта, мин
LiPo 6S 10 Ah (222 Вт·ч)	8.82	6.44	391.0	27.3
Li-ion 6S4P Molicel P45B (389 Вт·ч)	9.32	6.62	421.0	47.1
LiPo 6S 16 Ah (355 Вт·ч)	9.53	6.69	433.0	39.3

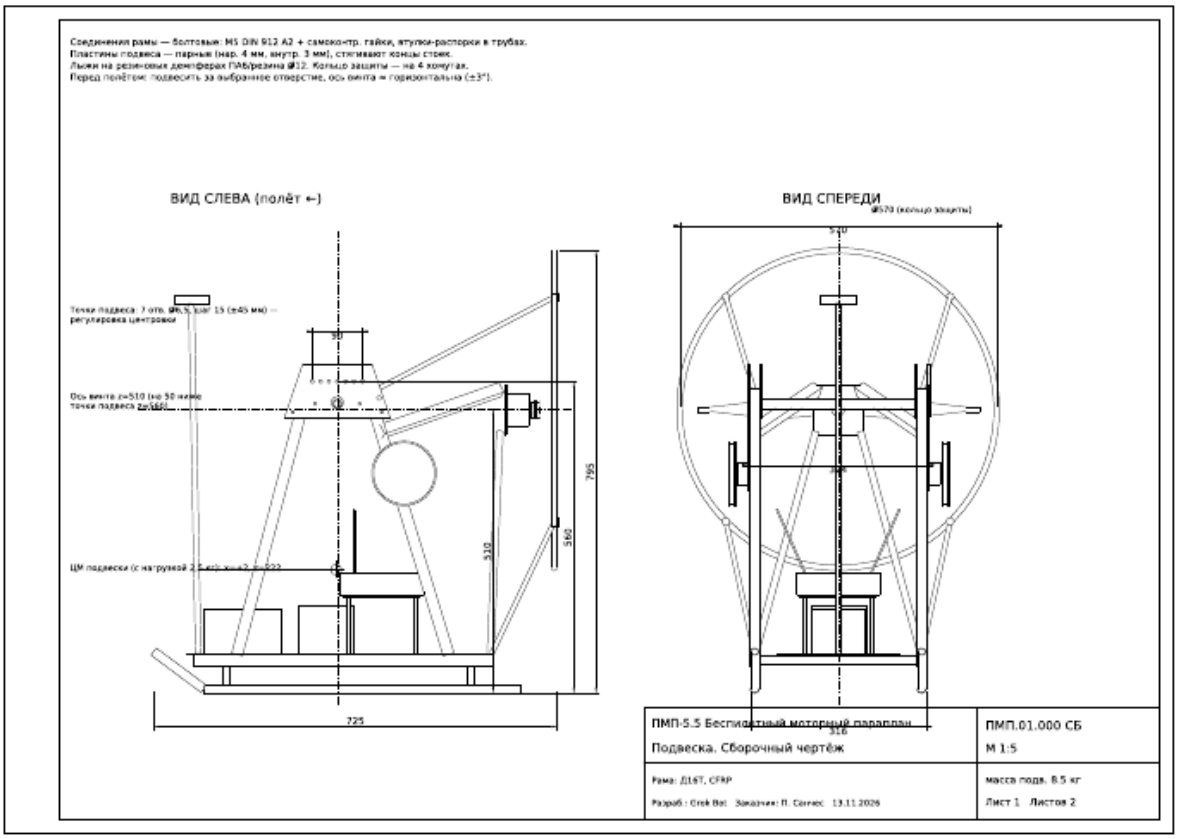
Время полёта: 15 % — набор высоты, 85 % — горизонт, остаток 15–20 % ёмкости (для Li-ion полезно 85 %, для LiPo — 80 %). Масса нагрузки во всех вариантах 2,5 кг, кроме LiPo 10 А·ч (2,0 кг —

сравнение при той же скорости).

4. Массы и центровка (по модели FreeCAD)

Группа	Масса, кг
Рама: трубы Д16Т, пластины подвеса, поперечины	2.031
Лыжи-шасси и демпферы	0.274
Защита винта: кольцо, спицы, хомуты, сетка	0.253
Сервы 2×35 кг·см + барабаны Ø110	0.318
Свободные концы, мейлоны	0.074
Площадка и ремень АКБ	0.153
Авионика: ПК, приёмник, телеметрия, GPS, мачта, антенны, плата, крышка, стойки	0.302
ESC 80 A	0.09
Мотор MAD 5015 IPE V3 KV320	0.36
Винт 20×6 карбон	0.07
Провода, разъёмы	0.15
Подвеска без АКБ и нагрузки	4.08
АКБ Li-ion 6S4P	1.9
Нагрузка / балласт	2.5
Купол со стропами	0.85
Взлётная масса	9.32

Центр масс подвески (с АКБ и нагрузкой) в системе модели: x = +2.0 мм (вперёд +), y = -0.5 мм, z = 222 мм от низа лыж; точки подвеса — x = 0, y = ±162, z = 560 мм. Без нагрузки x = -5.6, z = 267 мм. **ЦМ лежит на вертикали точек подвеса** (±6 мм) — подвеска висит ровно; ЦМ ниже подвеса на 338 мм. Положение АКБ на продольных направляющих позволяет сдвигать ЦМ на ±25 мм для тонкой балансировки (по наклону подвески в висении: рама горизонтальна).



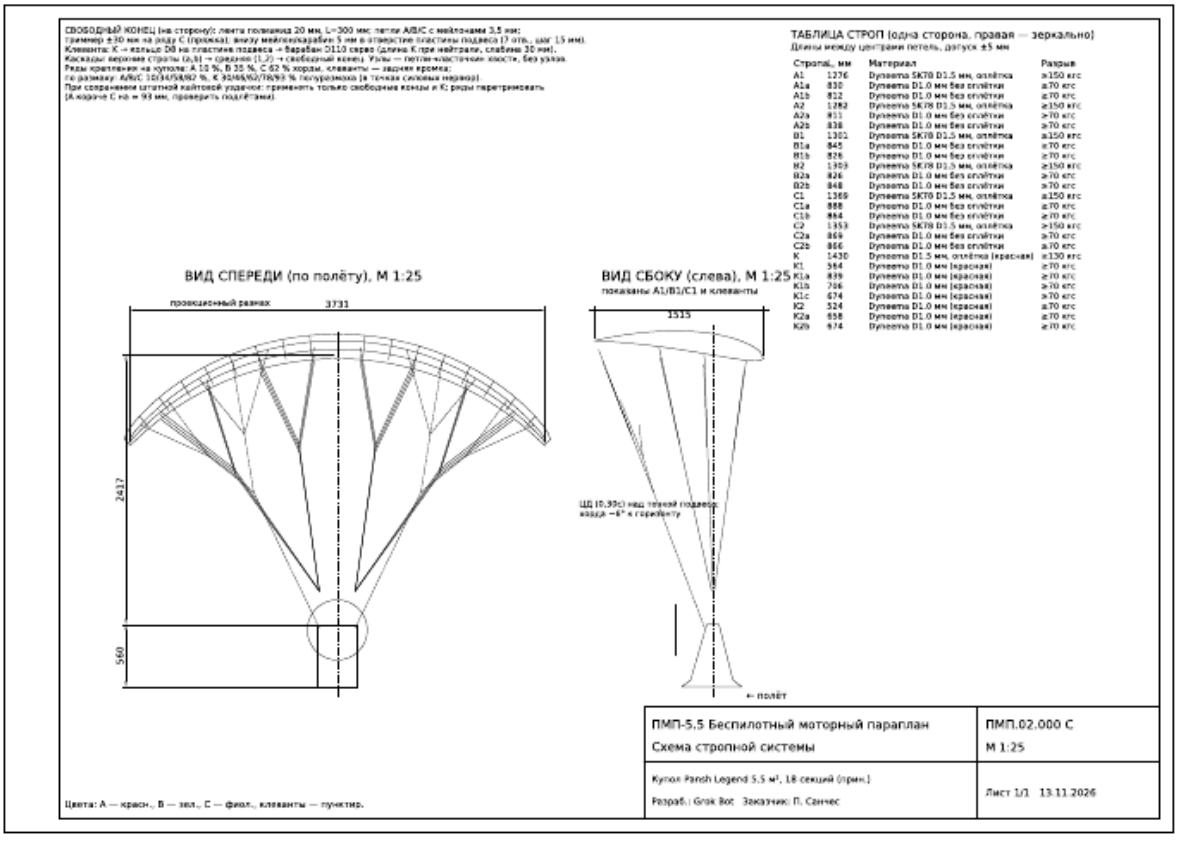
5. Стропная система и усилия

Расстояние от купола до точек подвеса R = 2.43 м = 0,58 плоского размаха (рекомендуемый диапазон 0,5–0,7). Меньшее R — короче стропы и меньше сопротивление, но хуже устойчивость купола по крену и выше нагрузка на крайние секции; большее — больше маятниковое запаздывание. Схема: три несущих ряда A/B/C (точки 10/35/62 % хорды) и тормоза; по размаху по 4 точки на ряд на сторону; каскад «основная стропа → 2 верхних».

Стропа	Длина, мм	Материал	Разрыв
A1	1276	Dyneema SK78 D1.5 мм, оплётка	≥150 кгс
A2	1282	Dyneema SK78 D1.5 мм, оплётка	≥150 кгс
B1	1301	Dyneema SK78 D1.5 мм, оплётка	≥150 кгс
B2	1303	Dyneema SK78 D1.5 мм, оплётка	≥150 кгс
C1	1369	Dyneema SK78 D1.5 мм, оплётка	≥150 кгс
C2	1353	Dyneema SK78 D1.5 мм, оплётка	≥150 кгс
K	1430	Dyneema D1.5 мм, оплётка (красная)	≥130 кгс

Полная таблица длин (включая верхний каскад), раскладка точек и крепление к свободным концам — на листе ПМП.02 «Схема стропная» (PDF/DXF). Длины даны от оси мейлона до точки крепления на куполе при натяжении 1 кгс. Технологический допуск ±5 мм, симметрия левой и правой стороны — ±3 мм.

Нагрузка	Значение	Комментарий
На свободный конец, 1g	45.7 Н	на каждый из двух свободных концов
Расчётная, n = 3	137.0 Н (14.0 кгс)	рывок при наполнении, порывы
Разрушающая (×1,5)	206.0 Н	карабин ≥ 500 кгс, мейлон 4 мм нерж. ≥ 300 кгс — с большим запасом
Распределение по рядам	A 36 % · B 34 % · C 22 % · тормоза 8 %	балансировка ram-air
Клеванта, полный тормоз 1g	6.4 Н	≈7 % веса на сторону
Клеванта, расчётное	16.0 Н	×2,5 (вираж, порывы)



Привод клевант

Серво DS3235 (35 кг·см при 7,4 В, ≈30 кг·см при 6 В, 270°). ArduPilot ограничивает выход 800–2200 мкс, что даёт поворот ≈189°. Требуемый ход клеванты 180 мм (руление 0–80 мм, выравнивание/тормоз до 180 мм) → барабан Ø110 мм (ход 181 мм). Потребный момент 9.0 кг·см, запас ×3.9 (при 6 В ×3,3). Полный ход ≈ 0.35 с. Клеванта идёт от барабана через кольцо-направляющую на пластине подвеса (Ø8) вверх к каскаду тормозных строп. В нейтрали — лёгкое поджатие ≈7 % хода (TRIM 900 мкс), чтобы стропа не провисала и не цеплялась за винт.

Медленные «парусные лебёдки» (1–1,4 с на 60°) не подходят: для управления креном параплана нужен ход 80–100 мм за 0,2–0,3 с.

6. Маятниковая устойчивость

Подвеска — маятник длиной $L = R + h_{ЦМ} = 2.43 + 0.34 = 2.77$ м, период $T = 2\pi\sqrt{(L/g)} =$ **3.34 с** (0.3 Гц). Ось винта на 50 мм ниже точек подвеса — на полном газе подвеска отклоняется лишь на ≈5.3°, тяга почти не создаёт «раскачки» тангажа.

Рекомендации: (1) регулятор крена мягкий — постоянная времени RLL2SRV_TCONST ≈ 1,2 с, интегратор малый, ROLL_LIMIT 25°; (2) TECS_TIME_CONST 8 с и THR_SLEWRATE 40 %/с — газ меняется медленнее периода маятника, иначе раскачка по тангажу; (3) автопилот установлен на подвеске — это нормально, контроллер стабилизирует систему «купол+подвеска», крен подвески практически равен крену купола при T ≈ 3 с; (4) не допускать резкой перекладки клевант на малой высоте; (5) при раскачке по крену уменьшить RLL_RATE_P на 20–30 %, при «вялом» развороте — увеличить RLL_RATE_FF.

7. Автопилот ArduPlane: схема управления и порядок ввода в эксплуатацию

Клеванты подключены как флапероны: **S3 — правая клеванта (SERVO3_FUNCTION = 24)**, **S4 — левая (SERVO4_FUNCTION = 25, реверс)**. Функции намеренно «перекрёстные»: при команде крена вправо ArduPilot опускает левый флаперон — а у параплана для поворота вправо тянется правая клеванта. Канал «закрылки» (RC7, ползунок, RC7_OPTION = 208) тянет обе клеванты — выравнивание и торможение. Тангажом параплан не управляется: датчика скорости нет (ARSPD_USE = 0), TECS_SPDWEIGHT = 0, и требуемый тангаж через TRIM_THROTTLE и THR_MAX превращается в газ — «газ = высота». Режимы: MANUAL / FBWA / FBWB / LOITER / AUTO / RTL на 6-позиционном канале RC6; ARM — тумблер RC5; автотюн — RC8. Отказ связи: через 1,5 с круг, через 5 с RTL; геозона 120 м по высоте и 500 м по радиусу. Полный файл параметров с комментариями — PMP55_ArduPlane.param.

Этап	Действия	Критерий перехода
0. Стенд	прошивка ArduPlane 4.6+, загрузка .param, калибровка акселерометра (рама горизонтально), компаса (на улице), пульта; проверить направления: RC1 вправо → тянется правая клеванта; RC7 вниз → обе тянутся; в FBWA наклонить подвеску вправо → тянется ЛЕВАЯ	все направления верны, ток покоя ≤ 0,5 А
1. Мотор на земле	без купола, подвеска закреплена: газ 0–90 %, ток ≤ 60 А, вибрации (VIBE ≤ 30), температура мотора/ESC через 2 мин	тяга ≥ 5 кгс по безмену
2. Наполнение	купол со стропами, ветер 2–3 м/с, мотор выключен: подъём купола «стенкой», симметрия, отсутствие закрутки клевант	купол встаёт без сваливания на крыло
3. Подлёт MANUAL	штиль/ветер ≤ 3 м/с, ровное поле; разбег по ветру с газом 70–90 %, полёт по прямой 5–10 м высоты, посадка с выравниванием RC7	устойчивый прямолинейный полёт
4. FBWA	высота 30–50 м, развороты 10–20° крена; подобрать SERVO3/4_TRIM для прямого полёта; по логам CTUN.ThO — TRIM_THROTTLE	крен отслеживается без раскачки
5. AUTOTUNE	только крен (AUTOTUNE_AXES = 1, LEVEL 4): в FBWA включить RC8, плавно и резко отклонять стик крена 10–20 раз в каждую сторону ~2 мин, выключить RC8 (усиления сохранятся при переходе в другой режим)	RLL_RATE_P/I/FF записаны, полёт мягкий
6. FBWB	удержание высоты газом; подобрать TECS_TIME_CONST, TRIM_THROTTLE; проверить THR_MAX	высота ±3 м
7. LOITER/RTL	радиус 40 м, NAVL1_PERIOD 25 (увеличить при «рысканье» по траектории); проверка отказа связи: выключить пульт на 20–50 м высоты	RTL отработан, возврат в круг над домом
8. AUTO	маршрут 3–5 точек, радиус точки 25 м, ветер ≤ 3 м/с; посадка — вручную до накопления опыта (LAND с LAND_FLAP_PERCNT 70)	повторяемость маршрута

8. Рекомендации, риски, ограничения

• Купол кайтовый: профиль и балансировка рассчитаны на тягу и большие углы атаки; при перетримовке возможны фронтальные сложения на газу и в порывах. Начинать с А короче С на 90 мм (по схеме), регулировать по 15–20 мм через петли на свободных концах.

• Защита винта обязательна: стропы клевант проходят рядом с винтом — сетка и кольцо Ø570, клеванты с поджатием, отбойник над винтом.

• Взлёт — с разбега по ветру (2–3 м/с) с поднятым куполом или с тележки/лыж; в штиль купол может не наполниться от обдува, нужен ассистент.

• Ветер: средний ≤ 4 м/с, порывы ≤ 5 м/с (скорость полёта всего 6,6 м/с). Над морем — только с береговым ветром вдоль побережья и с запасом высоты.

• Вес: 2,5 кг нагрузки или балласта нужны — лёгкая (6,3 кг) система летит 5,4 м/с и не проникает против ветра.

• АКБ Li-ion: не разряжать ниже 3,0 В/яч. под нагрузкой (BATT_CRT_VOLT 18,6 В), хранить 3,6–3,7 В/яч., корпус с вентиляцией и креплением на ремень и липучку.

• Компас — на мачте 250 мм; калибровать с собранной подвеской и подключённой АКБ.

• Правовые вопросы: в РФ БВС массой 0,15–30 кг подлежат учёту (постановление Правительства № 658 от 25.05.2019), полёты — по правилам использования воздушного пространства и региональным ограничениям, которые часто меняются; в Грузии — правила GCAA. Перед полётами проверить актуальные требования в месте полётов.

9. Аналогичные проекты (ссылки проверены 13.11.2026)

• **ArduPilot Discourse — «Powered Paraglider»** — https://discuss.ardupilot.org/t/powered-paraglider/90442. обсуждение ArduPlane на RC-параплане, качание подвески

• **PX4 Paramotor Project #2 — autonomous mission, RTL, altitude-stabilized flight** — https://discuss.px4.io/t/px4-paramotor-project-2-first-autonomous-mission-rtl-altitude-stabilized-flight/31125. автономный полёт RC-параплана (PX4), режимы mission/RTL

• **Autonomous Mini Powered Paraglider (Devpost)** — https://devpost.com/software/autonomous-mini-powered-paraglider. Pixhawk, клеванты на сервах, газ

• **ParaDrone (platypii)** — https://github.com/platypii/ParaDrone. открытый автопилот для парашюта/параплана/парамотора, ESP32

• **PPUAV — Powered Parafoil UAV (PX4, микшер)** — https://bing0037.github.io/projects/2017-12-15-PPUAV. энергетический регулятор, свой микшер клевант

• **SIA-PPG (исходники PPUAV)** — https://github.com/SIA-PPG

• **ArduPilot: флапероны** — https://ardupilot.org/plane/docs/flaperons-on-plane.html. настройка функций 24/25

• **ArduPilot: AUTOTUNE** — https://ardupilot.org/plane/docs/automatic-tuning-with-autotune.html

• **ArduPilot: TECS** — https://ardupilot.org/plane/docs/tecs-total-energy-control-system-for-speed-height-tuning-guide.html

• **ArduPilot: Failsafe** — https://ardupilot.org/plane/docs/apms-failsafe-function.html

• **ArduPilot: Matek H743-WING** — https://ardupilot.org/plane/docs/common-matekh743-wing.html. назначение UART и выходов

10. Состав комплекта документов

• PMP_01_chertezhi_ramy.pdf + DXF — сборочный чертёж подвески (3 вида, ЦМ), спецификация, детали

• PMP_02_stropy.pdf + DXF — стропная схема и таблица длин

• PMP_03_model — FreeCAD (FCStd) и STEP: подвеска и сборка с куполом

• PMP_04_BOM.xlsx/.pdf — спецификация покупных с ценами и ссылками

• PMP_05_elektroshema.pdf — схема электрическая

• PMP55_ArduPlane.param — параметры автопилота с комментариями

• Рендеры: полёт над побережьем и полем, подвеска