# МОТОРНО-ВИТЛОВИ ГРУПИ ЗА КВАДРОПЛАН

**Павлин Граматиков[1], Джулиан Тахов[2]**

*[1]Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките*
*[2]Д Аероспейс*
*e-mail: pgramatikov@space.bas.bg; juliantahov@gmail.com*

***Ключови думи:*** *хибридни безпилотни летателни апарати, вертикално излитане и кацане, квадроплан, бордни системи, управление на полета, дрон за картографиране, индустриален дрон*

***Резюме:*** *В статията са описани особеностите, проектирането, моделирането и управлението на квадроплани, съчетаващи квадрокоптер и летателен апарат с неподвижно крило. Анализиран е полета на квадроплани при режими на висене, крейсерски полет и преходен полет.*

# MOTOR-PROPELLER UNITS FOR A QUADPLANE

**Pavlin Gramatikov[1], Dzhulian Tahov[2]**

*[1]Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences*
*[2]D Aerospace*
*e-mail: pgramatikov@space.bas.bg; juliantahov@gmail.com*

***Keywords:*** *hybrid unmanned aerial vehicles, vertical take-off and landing quadcopter, onboard systems, flight control, mapping drone, industrial drone,*

***Abstract:*** *The article describes the characteristics, design, modeling, and control of quadplanes aircraft that combine a quadcopter with a fixed-wing configuration. It analyzes quadplane flight during hovering, cruising, and transition phases.*

## Въведение

Терминът "квадроплан" или квадросамолет (QuadPlane) в авиацията има две значения:

*Исторически квадроплан*: Това е самолет от началото на 20-ти век с четири крила, разположени едно над друго. Използва рядка и остаряла аеродинамична схема, в експериментални или ранни военни самолети (1916 г.).

*Модерен квадроплан (VTOL):* В днешно време, "квадроплан" се нарича хибриден БЛА (безпилотен летателен апарат), който съчетава крило на самолет с роторна система на квадрокоптер. Модерният квадроплан (наричан Lift+Cruise или VTOL) използва две отделни двигателно-витлови системи, за различни режими от полета. Представлява хибриден БЛА, комбиниращ вертикално излитане и кацане (VTOL) с полет на фиксирано крило.

***А. Група за вертикален полет (Lift Motors)***

Тази група отговаря за излитането, кацането и задържането във въздуха (hover).

*Конфигурация: Обикновено* включва 4 (или повече) мотора, разположени на рамена (както при квадрокоптер). Витлата им създават тяга надолу.

*Предназначение:* Осигуряват вертикална тяга, независима от крилото. Това позволява на квадроплана да излита и каца без писта.

*Характеристики:* Тези мотори често са с по-голям диаметър на витлата и по-нисък KV (обороти на волт), за да генерират максимална тяга при ниска скорост. Те са "излишен товар" по време на хоризонтален полет и увеличават съпротивлението и теглото на квадроплана.

***Б. Група за хоризонтален полет (Cruise/Pusher Motor)***

Тази група отговаря за движението напред и ефективния полет по маршрут.

*Конфигурация:* Обикновено това е един (или два) двигател, монтиран в предната (теглителна) или задната (бутаща) част на фюзелажа. Витлото е разположено хоризонтално.

*Предназначение:* Осигурява хоризонтална тяга, която позволява на крилото да генерира подемна сила. Самолетният режим е много по-енергийно ефективен и позволява по-висока скорост и далечина на полета.

*Характеристики:* Този двигател е оптимизиран за висока скорост и ефективност при крейсерски полет, а не за максимална тяга.

***Технически характеристики и управление на квадроплан***

*Управление:* Преходът между двете групи (транзиция) е критична фаза. Докато вертикалните мотори намаляват тягата, а крилото започва да поема тежестта, автопилотът (например ArduPilot или PX4) трябва плавно да управлява и двете системи.

*Разположение:* Моторните групи могат да бъдат фиксирани или наклоняеми (tilt-rotor) [6]. При фиксираните (както е класическият квадроплан) вертикалните мотори са винаги насочени нагоре, което е по-просто, но те създават допълнително въздушно съпротивление.

**Видове двигатели, конфигурации и пропелери за квадроплан**

***А. Видове двигатели за квадроплан****:*

*А1.Outrunner двигатели:* Характерно за тях е: роторът се върти около статора; по-висок въртящ момент при по-ниски обороти: идеални за директно задвижване на пропелери; По-добри за VTOL режим (вертикално излитане/кацане)

*А2. Inrunner двигатели:* Специфично е: роторът е вътре в статора; по-високи обороти (RPM); подходящи за скоростни полети; изискват редуктор за пропелери

***Б. Конфигурация на моторите:*** *Видовете са:* Quad (4 мотора) – най-популярна конфигурация; Hexa (6 мотора) – повишена надеждност; Octa (8 мотора) – за тежки товари; Tilt motors – накланящи се мотори за по-ефективен преход между режими [6].

***В. Видове пропелери***

В1. За VTOL мотори (вертикален полет):

- Ниска стъпка (low pitch)
- Голям диаметър: 7–12 in
- Оптимизирани за теглителна сила (thrust)
- По-висока ефективност при ниски скорости
- Осигуряват стабилност при излитане и кацане

В2. За основния пропелер (хоризонтален полет):

- Висока стъпка (high pitch): 6–10 in
- По-малък диаметър в сравнение с VTOL пропелерите
- Оптимизирани за скорост и ефективност
- Pusher (бутач) или Puller (теглещ) тип

В3. Специални пропелери:

Характерно е, че използват променлива стъпка (Variable Pitch):

- Автоматична адаптация между VTOL и cruise режим
- По-висока ефективност в двата режима
- По-сложни и скъпи

***Г. Конфигурации за задвижване***

Г1. Стандартна QuadPlane:

- 4 VTOL мотора в X-конфигурация
- 1 отделен мотор за хоризонтален полет (pusher/puller)
- VTOL моторите се изключват при преход към самолетов полет

Г2. Tilt-QuadPlane: [6]

- Накланящи се VTOL мотори (0–90°)
- Един и същи мотор за вертикален и хоризонтален полет
- По-сложна механика, но по-ефективна

**Експериментални и заводски квадроплани**

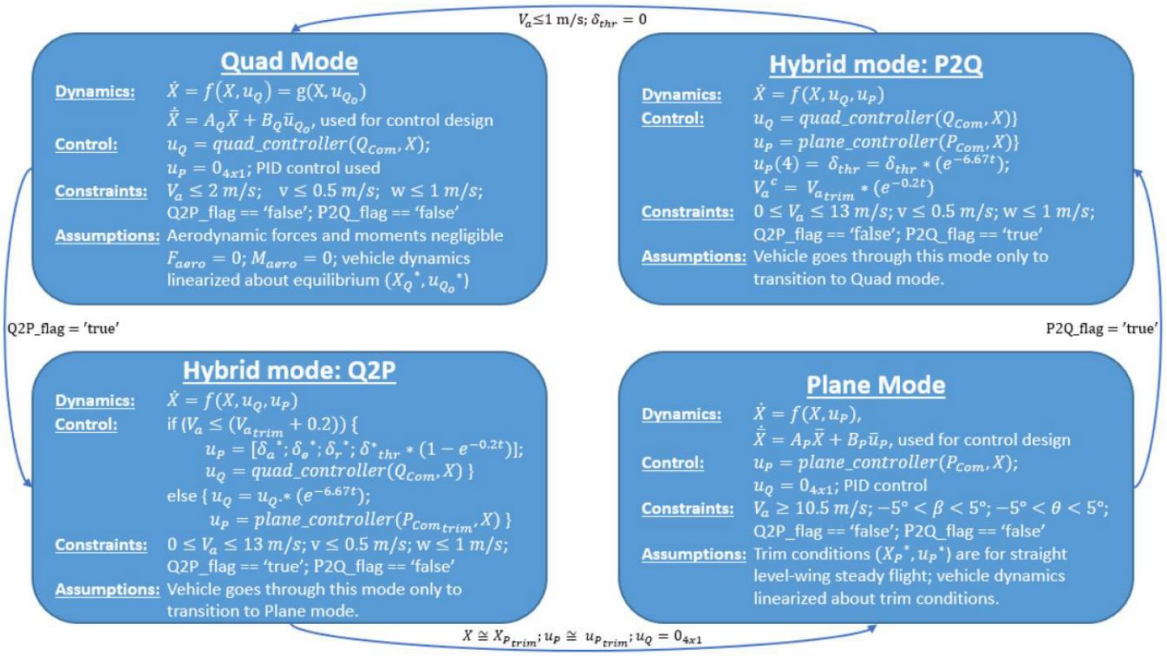
На фиг. 1 [1] е дадена хибридна система на квадроплан. Тя има четири режима на работа, виж фиг. 2 [1]. Това са квадрокоптерен режим; преходен режим от квадрокоптер към самолет (Q2P); самолетен режим и преходен режим от самолет към квадрокоптер (P2Q). Обикновено продължителността на Q2P е значително по-малка от P2Q.



Фиг. 1. QuadPlane [1]



Фиг. 2. Прототип от балса/композитен материал [1]



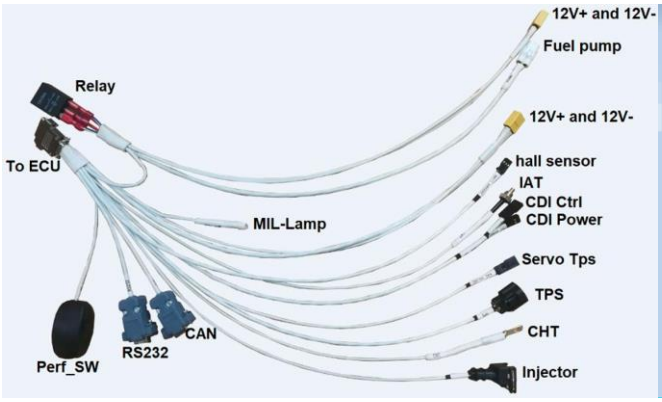

Фиг. 3. Модел на контролер на хибридна система с четири режима [1]

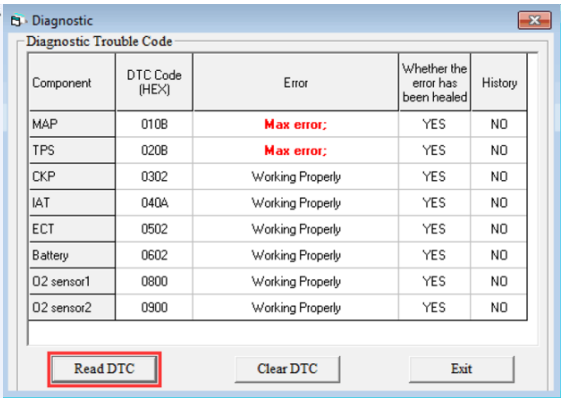
Да разгледаме един продукт на производителя YANGDA: Sky Whale Max Hybrid Heavy Lift Long Endurance VTOL Drone с тегло 25 kg [2]. Той има четири електрически мотора за режим квадрокоптер, използващи 30 in пропелер CF Propeller CW&CCW и един бензинов двигател 120cc EFI Engine Auto-starter & alternator с пропелер 26 in Wood CW за самолетен режим. Използва летателен контролер CUAV X7+ Pro с диференциален GPS. За комуникация се използват: радио контролер Futaba T6K V3S; 4G LTE и Starlink. Има 4 акумулаторни батерии: за роторите 3 броя 14S 10000 mAh HV Lipo и 1 брой 6S 16000 mAh Li-ion за авиониката. Резервоарът е за 18 L и позволява до 4 h продължителност на полета при полезен товар 15 kg и 10 h при 2 kg. Максималното излетно тегло (MTOW) е 65 kg, дължината на крилото е 4 m, дължината на самолета е 2,58 m, а височината е 0,85 m. Теглото без батерии и гориво е 37,5 kg. Круизната скорост е 85-100 km/h, максималната скорост е 130 km/h. Квадропланът е устойчив на вятър до 43,2 km/h. Максималната височина на полет е 4200 m.

Ако бензиновият двигател се замести с електрически, квадропланът позволява до 1,5 h продължителност на полета при полезен товар 10 kg; 2 h при 6 kg; и 3,5 h при 2 kg.

Системата за електронно впръскване на гориво (EFI, electronic fuel injection) е компютърно управляван метод за подаване на прецизно дозирано количество гориво към двигателя, който заменя механичните карбуратори. Да разгледаме силовата и управляващата електроника и електронното впръскване на гориво на бензинов двигател 120cc EFI Engine Auto-starter & alternator [4, 5]. Върху кабелния сноп на EFI системата е разположен превключвател за подкачване на гориво (Perf-SW, prime switch виж фиг. 4). Той ръчно активира EFI системата за впръскване на малко количество гориво преди стартиране на двигателя. Когато Perf-SW се поставя в позиция „I“ се впръсква малка доза гориво. Впръскването се извършва еднократно, дори ако превключвателят остане в позиция „I“.

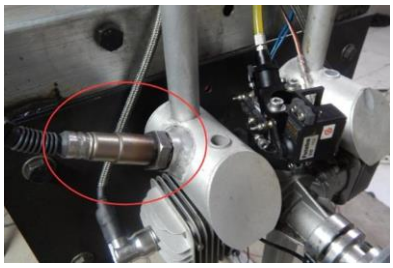
Електронният блок за управление (ECU, Electronic Control Unit, виж фиг. 10) може да отчита стойността на ламбда (AFR, виж фиг. 5) от контролера за широколентова сонда със сензор LSU4.9 (ALM); Отчитането на ламбда в реално време позволява настройка на горивните карти на EFI системата. Датчикът за температурата на цилиндровата глава (CHT, виж фиг. 9) се монтира на цилиндровата глава, в близост до запалителната свещ. Може също така да се постави под запалителната свещ.



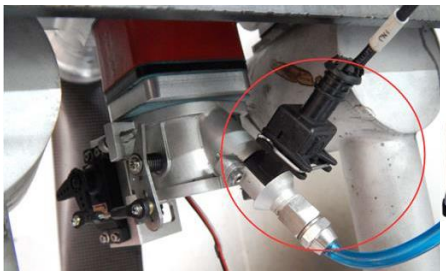




Фиг. 4. Система на бензинов двигател 120cc EFI

Фиг. 12. Проверка на бордната система чрез EcoCAL



Фиг. 5. Свързване на ламда сонда



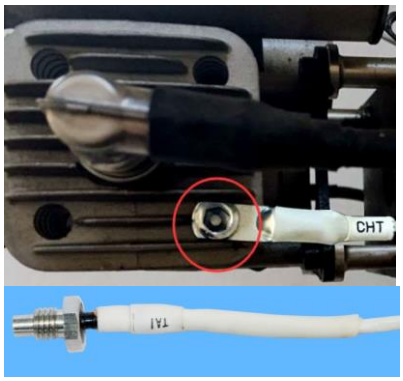
Фиг. 6. Свързване на инжектор



Фиг. 7. Свързване на TPS сензор




Фиг. 8. Електронно запалване CDI




Фиг. 9. Сензори CHT и IAT




Фиг. 10. Блок за управление ECU

Сензорът за температура на входящия въздух (IAT, виж фиг. 9) измерва температурата на въздуха, постъпващ в двигателя. Тъй като студеният въздух е по-плътен от горещия, ECU непрекъснато регулира подаването на гориво въз основа на сигнала от сензора, за да поддържа оптимално съотношение въздух-гориво при различни работни условия.

Параметрите на ECU са: алуминиев корпус с ниско тегло 120 g общо; компактен размер 78x64x20 mm; конектор тип mini-D (37 пина); вграден барометричен сензор с автоматична компенсация спрямо надморската височина; управление на двигатели с 1 или 2 цилиндъра (контрол както на впръскването на гориво, така и на запалването) и поддръжка на CAN шина).

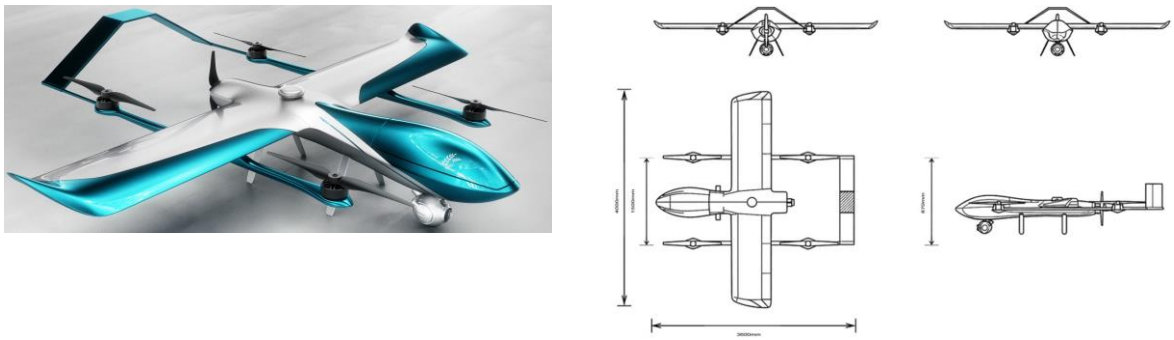
След свързване към лаптоп се чрез софтуера EcoCAL се визуализират следните параметри, виж фиг. 11 и фиг. 12. При подаване на команди: Read DTC: Go to Menu à Diagnostics -> ECU Diagnostics Click "Read DTC": Click "Clear DTC" се извършва диагностика на бордната система, виж фиг. 12.




Фиг. 11. Визуализация чрез софтуера EcoCAL

**Двигатели, пропелери и акумулаторна батерия за квадроплан до 52 kg излетна маса**

За авторски квадроплан с излетна маса до 52 kg (виж фиг. 13) са избрани в X-конфигурация 4 броя VTOL мотори V807 KV170 от производителя T-Motor [3]. Препоръчителните пропелери са G27 × 8,8; G28 × 9,2 и G29 × 9,5.



Фиг. 13. Квадроплан до 4 h полет и до 250 km разстояние [11]

Таблица 1. Спецификации на V807 KV170 12S Vtol Brushless Drone Motor с три пропелера [2]

**Test Data**

| Item No. | Prop | Throttle | Voltage (V) | Thrust (g) | Torque (N*m) | Current (A) | RPM | Inputpower (W) | Efficiency (g/W) | Operating Temperature ℃) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| V807 KV170 | G27*8.8 | 40% | 47.76 | 4047 | 1.39 | 10.41 | 2732 | 497.06 | 8.14 | 107℃ (Ambient Temperature: 22℃) |
| | | 45% | 47.69 | 5059 | 1.7 | 13.75 | 3021 | 655.5 | 7.72 | |
| | | 50% | 47.57 | 6445 | 2.17 | 19.81 | 3383 | 942.21 | 6.84 | |
| | | 55% | 47.42 | 7792 | 2.56 | 26.23 | 3699 | 1243.82 | 6.26 | |
| | | 60% | 47.3 | 9125 | 2.94 | 32.61 | 3993 | 1542.46 | 5.92 | |
| | | 65% | 47.06 | 10968 | 3.47 | 43.88 | 4362 | 2065.07 | 5.31 | |
| | | 70% | 46.9 | 12248 | 3.84 | 52.04 | 4602 | 2440.62 | 5.02 | |
| | | 75% | 46.69 | 13716 | 4.28 | 62.32 | 4867 | 2909.41 | 4.71 | |
| | | 80% | 46.49 | 14969 | 4.67 | 71.51 | 5077 | 3324.48 | 4.5 | |
| | | 90% | 46.04 | 17604 | 5.45 | 92.79 | 5445 | 4271.76 | 4.12 | |
| | | 100% | 45.52 | 19849 | 6.12 | 116.62 | 5785 | 5308.27 | 3.74 | |
| | G28*9.2 | 40% | 47.73 | 4372 | 1.56 | 11.04 | 2698 | 527.22 | 8.29 | 128℃ (Ambient Temperature: 22℃) |
| | | 45% | 47.65 | 5443 | 1.88 | 14.75 | 2988 | 702.9 | 7.74 | |
| | | 50% | 47.52 | 6915 | 2.37 | 21.39 | 3346 | 1016.23 | 6.81 | |
| | | 55% | 47.37 | 8307 | 2.77 | 28.13 | 3659 | 1332.57 | 6.24 | |
| | | 60% | 47.25 | 9702 | 3.17 | 34.67 | 3943 | 1637.97 | 5.92 | |
| | | 65% | 47.09 | 11073 | 3.57 | 42.37 | 4199 | 1995.01 | 5.55 | |
| | | 70% | 46.82 | 12865 | 4.11 | 55.21 | 4538 | 2584.99 | 4.98 | |
| | | 75% | 46.61 | 14442 | 4.56 | 65.73 | 4784 | 3063.87 | 4.71 | |
| | | 80% | 46.4 | 15717 | 4.95 | 75.55 | 4983 | 3505.38 | 4.48 | |
| | | 90% | 45.93 | 18275 | 5.74 | 97.82 | 5345 | 4492.59 | 4.07 | |
| | | 100% | 45.34 | 20721 | 6.46 | 124.56 | 5649 | 5647.55 | 3.67 | |
| | G29*9.5 | 40% | 47.69 | 5070 | 1.87 | 12.97 | 2620 | 618.39 | 8.2 | HOT |
| | | 45% | 47.59 | 6276 | 2.24 | 17.37 | 2897 | 826.77 | 7.59 | |
| | | 50% | 47.42 | 7916 | 2.84 | 25.28 | 3240 | 1199.04 | 6.6 | |
| | | 55% | 47.26 | 9558 | 3.34 | 33.51 | 3554 | 1584.03 | 6.03 | |
| | | 60% | 47.08 | 11083 | 3.82 | 42.4 | 3819 | 1996.3 | 5.55 | |
| | | 65% | 46.93 | 12433 | 4.23 | 49.99 | 4042 | 2346.17 | 5.3 | |
| | | 70% | 46.62 | 14312 | 4.83 | 65.04 | 4338 | 3032.08 | 4.72 | |
| | | 75% | 46.33 | 15888 | 5.31 | 78.22 | 4552 | 3624.2 | 4.38 | |
| | | 80% | 46.09 | 17138 | 5.71 | 89.68 | 4727 | 4133.43 | 4.15 | |
| | | 90% | 45.54 | 19498 | 6.46 | 115.33 | 5024 | 5251.58 | 3.71 | |
| | | 100% | 44.71 | 20997 | 6.93 | 151.7 | 5200 | 6782.02 | 3.1 | |

Notes：Motor temperature is the motor surface temperature aftering running at 80% for 10 mins. (Based on T-MOTOR test bench(es), all data are for reference only. T-MOTOR reserves the right of final interpretation. )

Отделните тегла са: 55 g за пропелер G28 × 9,2; 650 g за мотор V807; 150 g за проводници; 279 g за контролер на скоростта ESC Flame 180A 12S V2.0. Общо една мотор витлова група тежи 650 + 150 + 55 + 279 = 1134 g. От таблицата на производителя при газ (throttle) 70% и напрежение на батерията 46,82 V моторът V807 има статична тяга 12865 g; ток на консумация 55,21 A; въртящ момент 4,11 N/m; обороти 4538 RPM; консумация 2584,99 W и ефективност 4,98 g/W. Очаква се при излетна маса 12865 * 4 = 51460 g общата консумация на 4 мотора V807 да е 2584,9 * 4 = 10339 W и общ ток 55,21 * 4 = 220,84 A при напрежение на батерията 46,82 V. Предлагат се две силнотокови батерии Daerospace 12S 12 Ah, за квадрокоптерната част и 1 брой 6S 16 Ah за самолетната част. За полетно време при две батерии Daerospace 12 Ah 12s с енергия 46,82 * 12 * 2 = 1123,68 Wh се получава 1123,68 / 10339 = 0,10868 h или 6,5208 min, при C = 220,84 / 24 = 9,2. Коефициентът на запас по тяга отчитен по табл. 1 (съответно при газ 100% и 70%) има стойност 20721 / 12865 = 1,61065, която е по-нисък от желания 2 или повече. Предлага се използването на гъвкав силиконов кабел 12AWG между батериите и моторите, със сечение 4 mm², с ток до 88 A и тегло 0,1 kg/m. За проводниците съгласно фиг. 13 общата дължина е 4 * 1,546 + 4 * 1,115 = 10,644 m и общото тегло е 10,644 * 0,1 = 1,0644 kg. За бензинов двигател се предлага от китайския производител DLE (DL Engine) модел DLE 111 с параметри: обем 111,2 cm³; мощност 11,2 hp при 7 500 RPM и статическа тяга 25,5 kg на морско ниво [12]. Препоръчани пропелери са 27 × 10; 26 × 12 и 28 × 10, 28 × 12.

**Заключение**

Анализирани са характеристиките на двигатели и пропелери на квадроплани, съчетаващи квадрокоптер и летателен апарат с неподвижно крило. При сравнение на времето на полета един и същ квадроплан, задвижван от бензинов и електрически двигател за хоризонтална тяга при 2 kg полезен товар е получено съотношение 10 / 3,5 = 2,857 в полза на бензиновия. За VTOL мотор V807 KV170 е избран пропелер G28 × 9,2 и две батерии 12Ah 12s, и е изчислено време за полет в квадрокоптерен режим до 6,5 min.

**Литература:**


1. Mathur, Akshay, and Ella M. Atkins. "Design, modeling and hybrid control of a quadplane." In *AIAA Scitech 2021 Forum*, p. 0374. 2021, pp. 1–16. https://doi.org/10.2514/6.2021-0374, https://www.researchgate.net/publication/348254161_Design_Modeling_and_Hybrid_Control_of_a_QuadPlane
2. https://www.yangdaonline.com/yangda-sky-whale-max-hybrid-heavy-lift-long-endurance-vtol-drone/
3. https://store.tmotor.com/product/v807-vtol-motor.html
4. https://infinject.com/wp-content/uploads/2024/09/INF-DA120-UAV-EFI-Engine-Specifications.pdf
5. https://www.ecotrons.com/files/UAV%20engine%20EFI%20installation%20manua-DLE120_V1.9.pdf
6. Mancinelli, Alessandro, Bart DW Remes, Guido CHE de Croon, and Ewoud JJ Smeur. "Unified incremental nonlinear controller for the transition control of a hybrid dual-axis tilting rotor quad-plane." IEEE Transactions on Robotics 41 (2024): 306–325. DOI: 10.1109/TRO.2024.3498372, https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=10752979
7. Павлин Граматиков, Райчо Тодоров. Проектиране и параметри на работещ при екстремални условия електрически квадрокоптер. Proceedings SES'2022, Space Research and Technology Institute Bulgarian Academy of Sciences, 2022, ISSN:p-ISSN 2603-3313 e-ISSN 2603-3321, 108–114. http://www.space.bas.bg/SES/archive/SES%202022_DOKLADI/2_Aerospace%20Technologies/4_Gramatikov.pdf
8. Павлин Граматиков, Джулиан Тахов. Моторно-витлови групи и акумулаторни батерии за хексакоптер. Сборник доклади от годишна университетска научна конференция, Технически науки, Издателски комплекс на НВУ „Васил Левски”, Велико Търново, 2023, ISSN:2367-7481, 1447–1457. https://www.researchgate.net/publication/371494900_MOTORNO-VITLOVI_GRUPI_I_AKUMULATORNI_BATERII_ZA_HEKSAKOPTER_MOTOR-PROPELLER_GROUPS_AND_RECHARGEABLE_BATTERIES_FOR_HEXACOPTER
9. Павлин Граматиков, Райчо Тодоров. Летателни и електрически параметри на X8 октокоптер с излитане и кацане от водни басейни. Proceedings SES'2022, Space Research and Technology Institute Bulgarian Academy of Sciences, 2022, ISSN:p-ISSN 2603-3313 e-ISSN 2603-3321, 115–120. http://www.space.bas.bg/SES/archive/SES%202022_DOKLADI/2_Aerospace%20Technologies/5_Gramatikov.pdf
10. Павлин Граматиков. Изследване на характеристиките на полета на безпилотни електрически квадрокоптери. Proceedings SES'2021, Space Research and Technology Institute Bulgarian Academy of Sciences, 2021, ISSN:p-ISSN 2603-3313 e-ISSN 2603-3321, 108–113.
11. https://d-aerospace.com/
12. https://www.dlengine.com/en/rcengine/dle111