

ПРОЕКТИРАНЕ И ПАРАМЕТРИ НА РАБОТЕЩ ПРИ ЕКСТРЕМАЛНИ УСЛОВИЯ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ КВАДРОКОПТЕР

Павлин Граматиков¹, Райчо Тодоров²

¹Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките

²Първа Частна Експериментална Лаборатория за Аерокосмически Изследвания

"Райт – Аероспейс" – ЕООД

e-mail: pgramatikov@space.bas.bg; rait_aerospace@abv.bg

Ключови думи: Летателни характеристики, електрически параметри, безпилотен електрически квадрокоптер

Резюме: Предложен е прототип на безпилотен електрически квадрокоптер, работещ при екстремални условия. Проектирани, изследвани и реализирани са конструкцията, моторно-витловата група и електрозахранващата система. Приложени са чертежи и снимки на прототипа. Описани са публикувани разработки в областта на доклада.

DESIGN AND PARAMETERS OF AN OPERATING UNDER EXTREME CONDITIONS ELECTRIC QUADCOPTER

Pavlin Gramatikov¹, Raicho Todorov²

¹Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences

²LTD RAIT - AEROSPACE - FPLEASR

e-mail: pgramatikov@space.bas.bg; rait_aerospace@abv.bg

Keywords: Flight characteristics, electrical parameters, unmanned electric quadcopter

Abstract: A prototype of an unmanned electric quadcopter operating under extreme conditions is proposed. The structure, motor-propeller group and power supply system are designed, investigated and implemented. Drawings and photographs of the prototype are attached. Published work in the area of the report is described.

Въведение

Електрическият квадрокоптер съчетава технологични характеристики, съответстващи на съвременните тенденции в транспортната индустрия и обществото, като автономност, гъвкавост и подвижност [5]. В статията [5] се предлага модел на енергийното потребление на безпилотни летателни апарати (БЛА) и се описва енергията за доставки с БЛА в зависимост от условията на околната среда и модела на полета. В селски райони с големи разстояния между клиентите, системата за доставка на пратки с БЛА създава потребление на енергия, сравнимо с това на система за доставка на пратки с електрически камиони [5]. При логистичните приложения най-важните технически параметри са полезният товар и радиусът на действие. В момента, се използват предимно малки модели с полезен товар до 5 kg с и големи модели с полезен товар до 40 kg [5]. Полезният товар и радиусът на действие са взаимно зависими, понеже разходът на енергия зависи от полезния товар. Метеорологичните условия и скоростта на придвижване влияят на разхода енергия. Тя се увеличава драстично при насрецен вятър. Потреблението на енергия и капацитетът на акумулаторната батерия на БЛА определят радиуса на действие [5]. Моделът на енергопотреблението търси мощността P_m за придвижване на точка с маса m , като сума от четири мощности, съгласно следните формули [5]:

$$(1) \quad P_m = P_{roll} + P_{air} + P_{grade} + P_{inert},$$

$$(2) \quad P_m = g \cdot c_{roll} \cdot v \cdot m + A \cdot v^3 \cdot \frac{\rho \cdot c_{air}}{2 \cdot 10^3} + g \cdot i \cdot v \cdot m + 0,504 \cdot n^{acc} \cdot \frac{m \cdot v^3}{3,6 \cdot 2 \cdot 10^3},$$

където: P_{inert} е мощност за ускорение; g е гравитационната константа; c_{roll} е коефициент на съпротивление; v е скоростта (съответно в km/h и m/s); m е маса на БЛА; A е площта на челната повърхност; ρ е плътност на въздуха; c_{air} е коефициент на аеродинамично съпротивление; i характеризира на пътя и n^{acc} означава честота на процеса на ускоряване до скорост v (km/h).

Ефективността на двигателите с вътрешно горене (DV) е около 45 %, а електрическите двигатели (EV) – около 90%. Общата ефективност ε_{EV} на електрическите БЛА може да бъде приблизително изчислена, съгласно следната формула [5]:

$$(3) \quad \varepsilon_{EV} = \varepsilon_{eng} + \varepsilon_{trans} + \varepsilon_{char} = 0,9^3 = 73 \%,$$

където: ε_{eng} е ефективност на двигателя; ε_{trans} е ефективност на трансмисията; ε_{char} е ефективност на зареждането на акумулаторната батерия.

Потреблението на енергия при БЛА се изчислява според характеристиките на полета. По принцип могат да се разграничат четири фази на полета на БЛА: излитане, хоризонтален полет, висене и кацане. За да се отчете енергийната потребност P_{UAV} при типичния процес на доставка на пратка с БЛА, се използват следните зависимости [5]:

$$(4) \quad P_{UAV} = P_{air} + k \cdot P_{lift} + P_{profile} + P_{int},$$

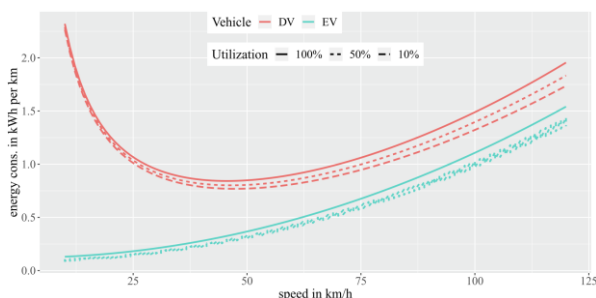
$$(5) \quad P_{UAV} = A \cdot v^3 \cdot \frac{\rho \cdot c_{air}}{2} + k \cdot w \cdot T + \rho \cdot R \cdot v^3 \cdot t \cdot \left[1 + \left(\frac{v}{v_t} \right)^3 \right] \cdot \frac{\sigma \cdot c_{bd}}{8} + P^{int} + g \cdot v \cdot \sin y,$$

където: P_{air} е мощност за преодоляване на въздушното съпротивление от тялото на БЛА; $P_{profile}$ е мощност на въздушно съпротивление от роторите на БЛА; P_{lift} е мощност на излитане; P_{int} е мощност за захранване на електрониката на БЛА; y е ъгъл на летене; v_t е скорост на върховете на лопатките (m/s); v е скорост на полета (m/s); R е площ на диска на ротора; σ е коефициент на съпротивление на лопатките; c_{bd} е коефициент на лопатките; k е коефициент на увеличаване (обикновено е 1,15). За пресмятане на тягата T се използват следните изрази [5]:

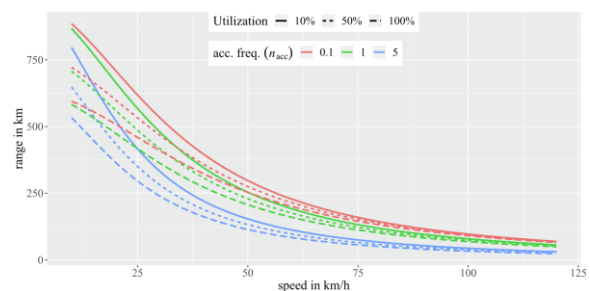
$$(6) \quad T = \sqrt{m^2 \cdot g^2 + 2 \cdot D^2 + 2 \cdot D^2 \cdot P_{climb}},$$

$$(7) \quad D = A \cdot v^2 \cdot \frac{\rho \cdot c_{air}}{2} \sqrt{m^2 \cdot g^2 + 2 \cdot D^2 + 2 \cdot D^2 \cdot P_{climb}}.$$

На Фиг. 1 са дадени зависимости на консумацията на енергия [KW/h] за 1 km от БЛА според скоростта на полет при използване на двигател с външно DV и на EV [5] при три полезни товара 100%, 50% и 10%. От фиг. 1 се забелязва, че DV (червен цвят) не е оптимален при скорости под 50 km/h, докато EV (зелен цвят) става все по-ефективен. На Фиг. 2 са дадени зависимости на консумацията на енергия [KW/h] за 1 km от БЛА според скоростта на полет при три полезни товара 100%, 50% и 10% [5].

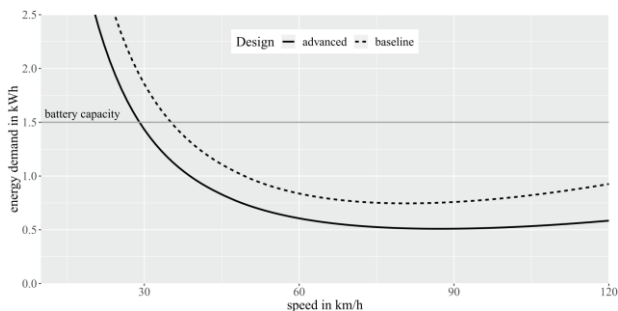


Фиг. 1. Консумация на енергия в зависимост от скоростта на БЛА при двигател с външно горене DV и електрически EV

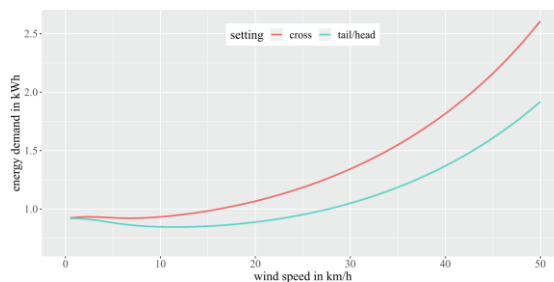


Фиг. 2. Разстояние на полета в зависимост от скоростта, полезния товар и честота на ускорението на БЛА

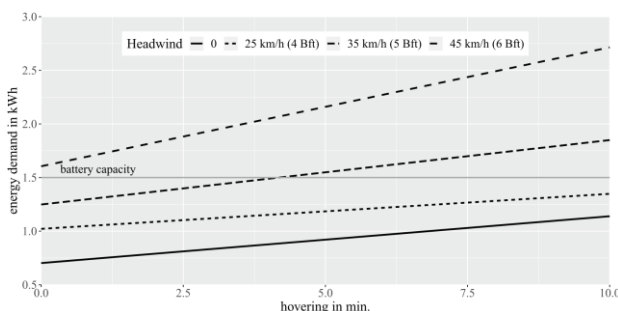
На Фиг. 3, Фиг. 4, Фиг. 5 и Фиг. 6, са дадени параметри на БЛА тип Amazon delivery drone (ADD) с радиус на действие 16 km, акумулаторна батерия 1,5 kWh с енергийна плътност 200 Wh/kg. На фиг. 3 е показано общото потребление на енергия от ADD по време на идеализиран процес на доставка на пратка в зависимост от скоростта, а на Фиг. 4 - зависимости на консумацията от скоростта и посоката на вятъра. На Фиг. 5 и Фиг. 6 е показано влиянието на вятъра върху времето на висене и потреблението на енергия на ADD.



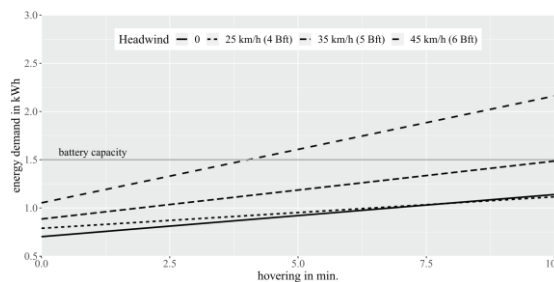
Фиг. 3. Консумация на енергия от скоростта на ADD при разстояние на доставка 16 km



Фиг. 4. Консумация на енергия на ADD от скоростта на вятъра и неговата посока с наклон 90°, 0° или 180° спрямо полета и при разстояние на доставка 16 km



Фиг. 5. Консумация на енергия на ADD според времето на висене при скорост на вятъра 0 km/h; 25 km/h; 35 km/h и 45 km/h с наклон 90° спрямо полета



Фиг. 6. Консумация на енергия на ADD според времето на висене при скорост на вятъра 0 km/h; 25 km/h; 35 km/h и 45 km/h с наклон 0° или 180° спрямо полета

Експериментална база

Конструкцията на X4 квадрокоптер със системи XRotor Pro X8, (съкратено X4X8) е авторска (виж фиг. 10) и има излетно тегло около 13 kg, без полезен товар.

Използвани са следните детайли за цялата конструкция: четири стандартни карбонови тръби с дължина 600 mm, диаметър Ф30 mm и дебелина 2 mm; едно проектирано нестандартно кръстообразно съединение 160x160 mm; четири вертикални стандартни карбонови тръби с дължина 250 mm, диаметър Ф20 mm и дебелина 2 mm; две хоризонтални стандартни карбонови тръби с дължина 500 mm, диаметър Ф20 mm и дебелина 2 mm; четири стандартни Т-образни връзки с диаметър Ф20 mm и дължина 20 mm; четири Т-образни стандартни връзки с диаметър Ф30 mm и дължина 20 mm; четири проектирани нестандартни ексцентрик-тръбни връзки.

За закрепване на моторно-витловата група на X4X8 се използват четири тръби с дължина 600 mm и едно проектирано кръстообразното съединение, изработено от материал Д16-Т, което е изработено от една заготовка с диаметър Ф165 mm и дебелина 45 mm. Детайлът е изработен като монолитно цяло на универсални металорежещи машини- струг и фреза.

Носещото шаси на X4X8 е изработено от четири вертикални тръби с дължина 250 mm; две хоризонтални тръби (с функция на две опори при кацане и излитане) с дължина 500 mm и четири ексцентрик-тръбни съединения, изработени от материал Д16-Т с диаметър Ф50 mm и дължина 50 mm изработени на универсален струг. Тези четири съединения служат за закрепване на носещата хоризонтална плоча за два акумулатора.

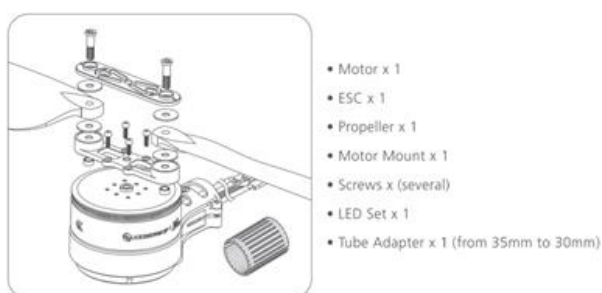
Авторската охлаждаща система на X4X8 се състои от: две перки, въртящи се в противоположни посоки (сдвоен осеви вентилатор); два безколекторни двигателя (захранващо напрежение 12 V с обща мощност 24 W), обезпечаващи необходимия въздушен дебит; едно проектирано кръстообразно съединение 160x160 mm в ролята на въздухоразпределител; един авторски дифузор за промяна на посоката на въздушния поток на 90° и стандартен въздушен филтър. Направени са експерименти за ефективността на охлаждащата система на X4X8. Тя намалява работните температури на четири вградени скоростни контролери и четири електродвигателя и увеличава съществено тяхното време за безотказна експлоатация.

За X4X8 разстоянието между центровете на два съседни двигателя е 930 mm, а от центъра на тръбната конструкция до всеки двигател разстоянието е 660 mm. Използваните два стандартни акумулатора тежат $2 \times 2400 = 4800$ g (всеки е 22 Ah-25C-6S, като сумарно имат енергия $4,2 \text{ V} \times 22 \text{ Ah} \times 12 = 1108,8 \text{ W/h}$). Съгласно [6] четири броя системи XRotor Pro X8 Power System тежат

1040*4=4160 g. Общото тегло на тръбната конструкция е 3000 g. За автопилот, преобразуватели DC/DC и проводници са заделени 740 g. Охлаждащата система тежи 300 g. За X4X8 при сумиране се получава излетно тегло 4800+4160+3000+740+300=13000 g- без полезен товар.

Системите XRotor Pro X8 Power System (Фиг. 7 и Фиг. 8) са водоустойчиви клас IPX7 при въздействие на дъжд, пестициди, солен дъжд, високи температури и пясъчен прах [7, 8]. Електрониката има: автоматично изключване при ненормални напрежения; автоматично включване след самостоятелно тестване; защита от свръх токове; защита от блокировка на двигателя. Вградена е телеметрия за входна газ, изходна газ, обороти, входно напрежение и ток, изходен ток; температура на кондензатора; температура на силовите транзистори. За двигателя тип PMSM (Permanent Magnet Synchronous Motor) се използва метод за поледи ориентиран контрол (Field Oriented Control) на въртенето на статора, базиран на алгоритъм, даващ стабилност, производителност и ефективност [2, 4].

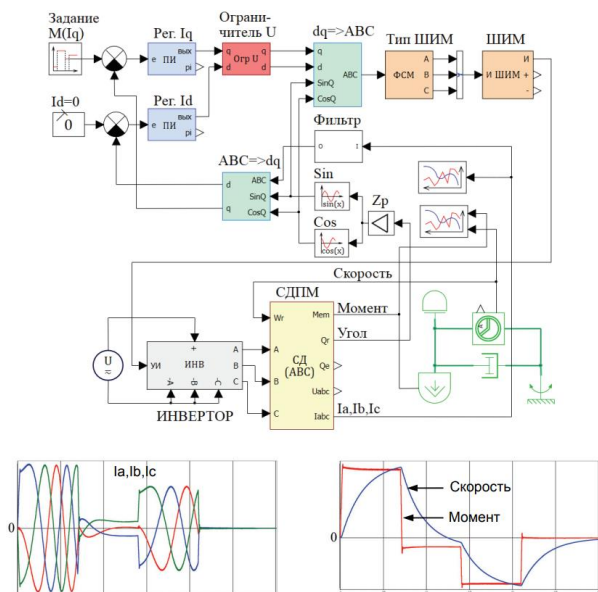
SimInTech е софтуер за създаване на математически модели, алгоритми за управление, интерфейси за управление и автоматично генериране на код за програмируеми контролери за векторно управлявани променливотокови двигатели (синхронни и асинхронни), както и постояннотокови безчеткови двигатели. Системите за управление на всички тези задвижвания са изградени съгласно специфични блок-схеми с краен брой варианти [2]. На Фиг. 9 са дадени времедиаграми и симулация чрез SimInTech на управлението и работа на PMSM.



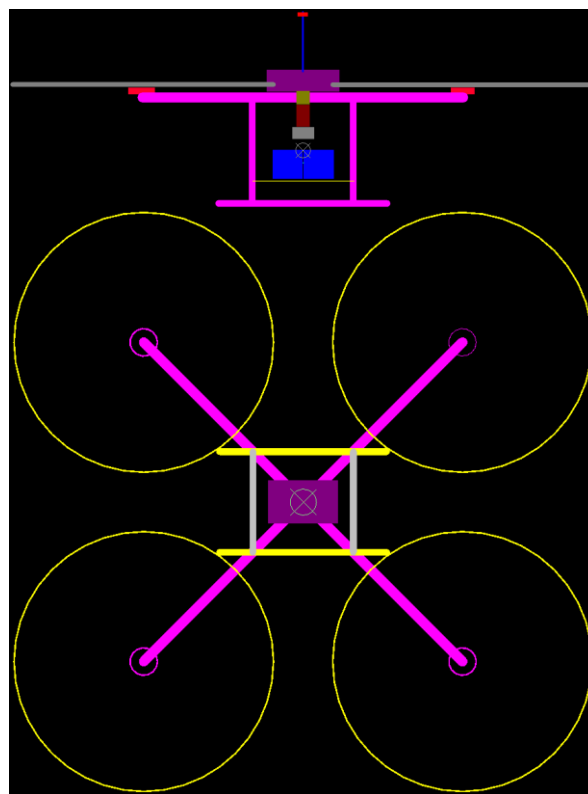
Фиг. 7. Детайли на X8 Power System



Фиг. 8. Монтаж и пропелери на X8 Power System



Фиг. 9. SimInTech - модел на система за управление на въртящия момент на синхронен двигател с постоянни магнити



Фиг. 10. Поглед отгоре и отстрани на X4X8 квадрокоптер с 3090 пропелер

Вграденият ярък светодиода служи за индикатор на работния статус и дава сигнал за внимание при ненормални състояния. Статорът на двигателя има диаметър $\Phi 81$ mm и височина $H=20$ mm [9]. Закрепването може да стане към тръби с диаметри $\Phi 30$ mm или $\Phi 35$ mm. Може да се използват три вида пропелери: 2911- приложим до (5 – 7) kg излетно тегло и до 15,3 kg максимална тяга; 3090- приложим до (5 – 7) kg излетно тегло и до 16,1 kg максимална тяга или 22 – 28 kg квадрокоптер и 32121- приложим до (5 – 8) kg излетно тегло и максимална тяга до 18 kg. Коефициентът KV за XRotor Pro X8 има стойност 100 KV и означава броя на

оборотите в минута (rpm), които двигателят постига при подаване на 1V, без да има товар към двигателя. Входният сигнал (Throttle Signal Frequency) е с честота (50 – 500) Hz и има продължителност е (1100 – 1940) μ s. Максималните продължителни входни токове са 80 A, а за 10 s двигателят може да издържи 100 A. Избраният акумулатор осигурява ток $22 \cdot 25/4 = 137,5$ A, който е $137,5/100 = 1,38$ пъти по-голям от максималния ток на двигателя.

Таблица 1. Параметри на X8 силова система с три пропелера 2911, 3090 и 3411

A(X)	B(Y)	C(Y)	D(Y)	E(Y)	F(Y)	G(Y)	H(Y)	I(Y)	J(Y)	K(Y)	L(Y)	M(Y)
Пропелер	P22x6.6	P22x6.6	P22x6.6	2911	2911	2911	3090	3090	3090	3411	3411	3411
Мотор	MN501S	KV240	KV240	X8 System	KV100	KV100	KV100	KV100	KV100	KV110	KV110	KV110
Газ	Тяга	Мощност	G/W	Тяга	Мощност	G/W	Тяга	Мощност	G/W	XRotor 9	Мощно	G/W
				1040 G						1400G		
37	--	--	--	--	--	--				2996	258	11.6
40	916	70	13.09	--	--	--				--	--	--
42	999	78	12.78	--	--	--	--	--	--	--	--	--
44	1088	87	12.43	--	--	--	3012	231.1	13	--	--	--
45	1127	91	--	3009	243.7	12.3	--	--	--	4970	493	10.1
46	1166	96	12.2	3099	255	--	--	--	--	--	--	--
48	1246	105	11.87	3315	277	--	--	--	--	--	--	--
50	1339	116	11.59	3547	304	--	--	--	--	--	--	--
51	1396	122	--	3999	376.1	10.6	4009	346.9	11.6	--	--	--
52	1453	128	11.3	4158	394	--	--	--	--	7030	807	8.7
54	1566	143	10.97	4490	441	--	--	--	--	--	--	--
56	1684	157	10.71	5012	529.9	9.5	5032	471.6	10.7	--	--	--
58	1796	172	10.44	5362	583	--	--	--	--	--	--	--
59	--	--	--	--	--	--	--	--	--	9048	1185	7.6
60	1900	187	10.15	5683	635	--	6000	615	9.8	--	--	--
61	1960	195	--	5999	687.6	8.7	--	--	--	--	--	--
62	2020	203	9.94	6178	715	--	--	--	--	--	--	--
64	2147	223	9.63	6548	786	--	6978	769.7	9.1	10938	1552	7
66	2273	239	9.51	7013	879.3	8	--	--	--	--	--	--
68	2394	258	9.28	7363	949	--	8009	957.6	8.4	--	--	--
70	2509	275	9.11	7988	1083.3	7.4	--	--	--	--	--	--
71	--	--	--	--	--	--	--	--	--	12947	2047	6.3
72	--	--	--	--	--	--	9009	1144.1	7.9	--	--	--
73	2666	301	--	9019	1293.1	7	--	--	--	--	--	--
74	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
75	2823	327	8.63	--	--	--	--	--	--	--	--	--
76	--	--	--	--	--	--	9970	1350.8	7.4	15041	2594	5.8
77	2930	353	--	9990	1519.2	6.6	--	--	--	--	--	--
78	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
80	3038	380	7.99	--	--	--	10984	1579.1	7	--	--	--
81	--	--	--	11017	1781.7	6.2	--	--	--	17037	3164	5.4
82	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
84	3246	440	--	12005	2033.6	5.9	12036	1812.5	6.6	--	--	--
86	--	--	--	--	--	--	--	--	--	19069	3811	5
87	--	--	--	--	--	--	12962	2031.8	6.4	--	--	--
88	3454	501	6.89	--	--	--	--	--	--	--	--	--
90	--	--	--	13991	2640.1	5.3	--	--	--	--	--	--
92	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
94	--	--	--	--	--	--	14954	2520.3	5.9	--	--	--
96	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
98	4187	612	6.84	--	--	--	--	--	--	--	--	--
100				15289	3134.9	4.9	16183	2944.2	5.5	22497	3799	4.4

Да пресметнем летателни и електрически параметри на X4X8 квадрокоптер [1] в три варианта при три полезни товара 13000 g=100%, 7500 g=50% и 0%: с моторно-витлова група, състояща се от два вида пропелера задвижвани от четири двигателя XRotor Pro X8 (може да работи с пропелери 2911, 3090 и 32121) и един вид пропелер, задвижван от четири двигателя XRotor Pro X9 (може да работи с пропелери 3411 и 36190). За целта ще използваме табл. 1 с данни от производителя на: двигател MN501S и пропелер P22x6,6; XRotor Pro X8 и пропелери 2911, 3090; XRotor 9 пропелер 3411.

Първи вариант на моторно-витлова група с пропелер 2911

При товар 0% нужната тяга при излитане от всяка системи XRotor Pro X8 ще бъде $13000/4=3250$ g. От табл. 1 при газ 47 тягата е 3207 g, а ефективността е 12,06 g/W. Мощността на излитане ще бъде $13000/12,06=1077,94$ W. Продължителност на полет при зависване: $1108,8 \text{ Wh}/1077 \text{ W} \cdot 94=1,03$ h.

При товар 7500 g тягата от всеки двигател ще бъде $(13000+7500)/4=5125$ g. От табл. 1 при газ 57 тягата е 5187 g, а ефективността е 9,32 g/W. Мощността на излитане ще бъде $(13000+7500)/9,32=2199,57$ W. Продължителност на полет при зависване: $1108,8/2199,5=0,504$ h.

При товар 13000 g тягата от всеки двигател ще бъде $(13000+13000)/4=6500$ g. От табл. 1 при газ 64 тягата е 6548 g, а ефективността е 8,33 g/W. Мощността на излитане ще бъде $(13000+13000)/8,33=3121,2$ W. Продължителност на полет при зависване: $1108,8/3121,2=0,355$ h.

Втори вариант на моторно-витлова група с пропелер 3090

При товар 0% нужната тяга при излитане от всяка системи XRotor Pro X8 ще бъде $13000/4=3250$ g. От табл. 1 при газ 46 тягата е 3194 g, а ефективността е 12,67 g/W. Мощността на излитане ще бъде $13000/12,67=1026$ W. Продължителност на полет при зависване: $1108,8/1026=1,0807$ h.

При товар 7500 g тягата от всеки двигател ще бъде $(13000+7500)/4=5125$ g. От табл. 1 при газ 57 тягата е 5207 g, а ефективността е 10,41 g/W. Мощността на излитане ще бъде $(13000+7500)/10,41=1969,2$ W. Продължителност на полет при зависване: $1108,8/1969,2=0,5631$ h.

При товар 13000 g тягата от всеки двигател ще бъде $(13000+13000)/4=6500$ g. От табл. 1 при газ 62 тягата е 6592 g, а ефективността е 9,41 g/W. Мощността на излитане ще бъде $(13000+13000)/9,41=2763$ W. Продължителност на полет при зависване: $1108,8/2763=0,401$ h.

Трети вариант на моторно-витлова група с пропелер 3411

Данните за X9 Power System от [10] сочат $1400-1040=360$ g по-голяма тегло спрямо X8 Power System и $22497-16183=6314$ g по-голяма тяга при газ 100%. Празен авторският квадрокоптер ще тежи $13000+360 \cdot 4=14440$ g

При товар 0% нужната тяга при излитане от всяка системи XRotor Pro X9 трябва бъде $(14400+7500)/9,77=2241$ W. Продължителност на полет при зависване: $1108,8/2241=0,4948$ h.

При товар 13000 g тягата от всеки двигател трябва бъде $(14400+13000)/4=6850$ g. От табл. 1 при газ 51 тягата е 6761 g, а ефективността е 8,77 g/W. Мощността на излитане ще бъде $(14400+13000)/8,77=3124$ W. Продължителност на полет при зависване: $1108,8/3124=0,3549$ h.

Четвърти вариант на моторно-витлова група с пропелер P22x6,6

При товар 0% нужната тяга при излитане от всеки двигател MN501S ще бъде $13000/4=3250$ g. От табл. 1 при газ 80 тягата е 3038 g, а ефективността е 7,99 g/W. Мощността на излитане е $13000/7,99=1627$ W. Продължителност на полет при зависване: $1108,8/1627=0,681$ h.

При товар 7500 g тягата от всеки двигател ще бъде $(13000+7500)/4=5125$ g. От табл. 1 при газ 100 тягата е 4187 g, което не достига.

Заклучение

Получените резултати показват, че четвъртият вариант не е подходящ за X4X8. При изравнени товари първи вариант, втори и трети вариант на моторно-витлова група съответно имат времена на полет: 1,03/0,504/0,355 h; 1,0807/0,5631/0,401 h и 0,8595/0,4948/0,3549 h. Поддръждането на вариантите по параметри е: първо място е за втория вариант; второ място е за първия; трето място е за третия; и четвърто място е за четвърти вариант. Поддръждането на вариантите по цена и тегло е както следва: на първо място е четвърти вариант; на второ място е първи вариант; на трето място е втори вариант; и четвърто място е за трети вариант. Изследванията показват, че най-тежкият и най-скъп трети вариант спрямо втория вариант лети 0,8787 пъти по-малко време с полезен товар 7500 g, а с товар 13000 g- 0,885 пъти по-малко време. Авторската тръбна конструкция е само 23% от излетното тегло 13 kg на X4X8, а съотношението между тръбната конструкция и моторно-витловата група е 0,721. Това позволява полети при определени условия до 1,08 h.

Благодарности: Настоящият доклад е изготвен в рамките на проект по т.1.1.6 от Национална научна програма „Сигурност и отбрана“ (приета с ПМС № 731 от 21.10.2021 г.) и съгласно Споразумение № Д01-74/19.05.2022 г. между МОН и Институт по отбрана „Професор Цветан Лазаров“.

Литература:

1. Граматиков, П., 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, p.p. 108–113.
2. Калачёв, Ю., SimInTech: моделирование в электроприводе, ISBN 978-5-97060-766-4, УДК 681.5, Москва, ДМК Пресс, 2019, pp. 1–90.
https://3v-services.com/books/978-5-97060-766-4/978-5-97060-766-4_SimInTech-01.pdf
3. Isfahani, A.H, S. Vaez-Zadeh, Line start permanent magnet synchronous motors: Challenges and opportunities, Energy, Volume 34, Issue 11, 2009, pp. 1755–1763.
ISSN 0360-5442, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.022>.
DOI: <https://doi.org/10.31875/2409-9694.2019.06.8>.
4. Islam, R., I. Husain, "Analytical Model for Predicting Noise and Vibration in Permanent-Magnet Synchronous Motors," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 6, Nov.-Dec. 2010, pp. 2346–2354, doi: 10.1109/TIA.2010.2070473.
5. Kirschstein, T., Comparison of energy demands of drone-based and ground-based parcel delivery services. Transportation Research Part D: Transport and Environment, ISSN 1361-9209, Vol. 78, 2020, pp. 1–10.
<https://doi.org/10.1016/j.trd.2019.102209>.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920919309575>.
6. Материал от интернет: <https://www.hobbywing.com/goods.php?id=594>.
7. Материал от интернет: <https://www.hobbywing.com/products/enpdf/ComboX8en.pdf>.
8. Материал от интернет: <https://www.hobbywing.com/goods.php?id=594>.
9. Материал от интернет: <https://www.hobbywing.com/products/enpdf/ComboX8en.pdf>.
10. Материал от интернет: [https://www.hobbywing.com/goods.php?id=651&filter_attr=.](https://www.hobbywing.com/goods.php?id=651&filter_attr=)