

## ИЗСЛЕДВАНЕ НА ХАРАКТЕРИСТИКИТЕ НА ПОЛЕТА НА БЕЗПИЛОТНИ ЕЛЕКТРИЧЕСКИ КВАДРОКОПТЕРИ

Павлин Граматиков

*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките  
e-mail: pgramamatikov@space.bas.bg*

***Ключови думи:** Летателни характеристики, безпилотен електрически квадрокоптер, електрически параметри, ArduPilot, INAV*

***Резюме:** Основни полетни и електрически параметри на два квадрокоптера са проучени с различни електрически задвижващи системи, батерии и полезни товари. Изследвани и приложени са графични и таблични експериментални данни от реални полети.*

## RESEARCH OF FLIGHT CHARACTERISTICS OF UNMANNED ELECTRIC QUADROCOPTERS

Pavlin Gramatikov

*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences  
e-mail: pgramamatikov@space.bas.bg*

***Keywords:** Flight characteristics, unmanned electric quadcopter, electrical parameters, ArduPilot, INAV*

***Abstract:** Basic flight and electrical parameters of two quadcopters have been studied in different electric propulsion systems, batteries and payloads. Graphical and tabular experimental data from real flights are studied and applied.*

### Въведение

Телеметрията на един безпилотен летателен апарат дава в реално време на земята процесите на борда и цели безавариен и безопасен полет. Предлага се пилот-инженер непрекъснато да я следи, да насочва и предупреждава летеца в процеса на полета.

От гледна точка на оптимизиране на енергийните параметри на един мултикоптер може да се използват експериментални изследвания в лабораторна среда. Като методика се предлагат тестови полети в затворено помещение за измерване и запис на важните параметри на служебната част от апаратурата на мултикоптер, както на борда, така и на земята по няколко комуникационни канали.

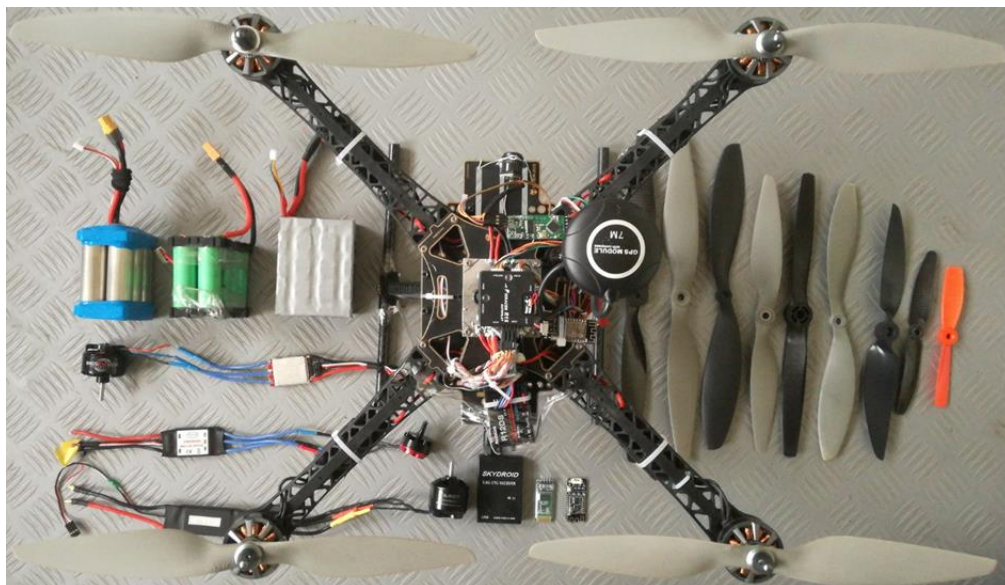
При оборудването на готова и завършена рама на електрически мултикоптер, се решават три основни задачи: оптимизиране на двигателната част (изследване на подходящи електрически двигатели, контролери на скоростта и пропелери към тях); избор и настройки на автопилот и софтуер към него, а за финал – изследване на различни акумулаторни батерии според задачите на полета. За целта при различни условия се разчитат, сравняват и анализират характеристики на полета от файлове на черната кутия на самолета и наземни записи.

### Експериментална база

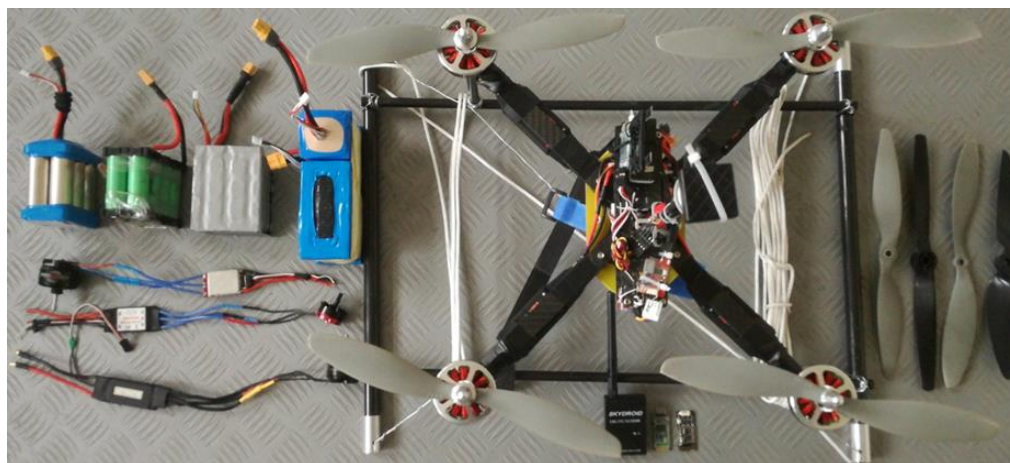
Извършени са над 20 полета с два електрически квадрокоптера (виж Фиг. 1 и Фиг. 2) с различно бордно оборудване в зала с размер 22x6 m и височина 4 m. Всеки от тях е изследван с три хардуера на бордни автопилоти на базата на следните процесори: STM32F405; STM32F765

и STM32F427. Изследвани са три варианта на софтуер: ArduPilot; INAV и Betaflight. В Таблица 1 са дадени част от параметрите на използваните бордни конфигурации.

Първата хардуерна част на бордния автопилот е дадена на Фиг. 3а. За полетен контролер се използва F405-STD който има 6 изхода за контролери на скоростта. Той работи съвместно с платка FCHUB-6S PDB, която има три функции: понижаващ преобразувател от 24 V към 5 V (BEC-5 V); радиопредавател 5,8 GHz (OSD FPV) и сензор за тока на батерията (Current1 184 A).



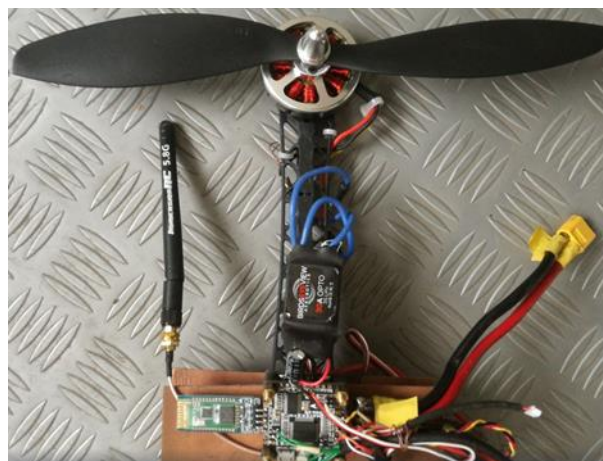
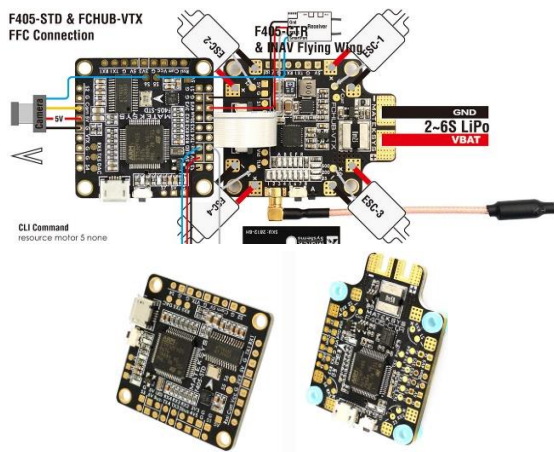
Фиг. 1. Електрически квадрокоптер №1 с разстояние между осите 340 mm и тегло 1122 g, без батерия



Фиг. 2. Електрически квадрокоптер №2 с разстояние между осите 275 mm и тегло без батерия 1250 g, включително шейна и въже за полет

Таблица 1. Три бордни конфигурации на безпилотни електрически квадрокоптери

MCU	IMU	Baro-meter	OSD	Blackbox	Soft	Sensor	BEC[V]	Tele-metry
STM32F405	ICM20602	BMP280	AT7456E	MicroSD 4 GB	Ardupilot Betaflight INAV	Battery1 Current <sub>out</sub> 184 A	Външен 5 V Външен 10 V	Bluetooth WiFi 2,4 GHz 5,8 GHz
STM32F765	ICM20602	SPL06-001	FrSky	MicroSD 4 GB	INAV	Battery1 Current1 150 A	5 V 5/6/7/8 V 5/9 V	Bluetooth 2,4 GHz 5,8 GHz
STM32F427 168 MHz 256KB RAM 2 MB Flash	MPU-9250	MEAS MS5611	ST LIS3MDL magneto- meter	MicroSD 4 GB	Ardupilot	Battery1 Current <sub>out</sub>	Външен 5 V	Bluetooth WiFi 2,4 GHz 5,8 GHz



Фиг. 3а,б,в. Първа бордна част <http://www.mateksys.com/?portfolio=f405-std#tab-id-1>

Част от втората хардуерна част на бордния автопилот е дадена на Фиг. 4. Използван е полетен контролер R9/RXSR Pilot, който има 12 изхода за контролери на скоростта и се захранва с напрежение от 11÷51 V. Той обединява в себе си 3 платки (виж Фиг.4а,б,в):

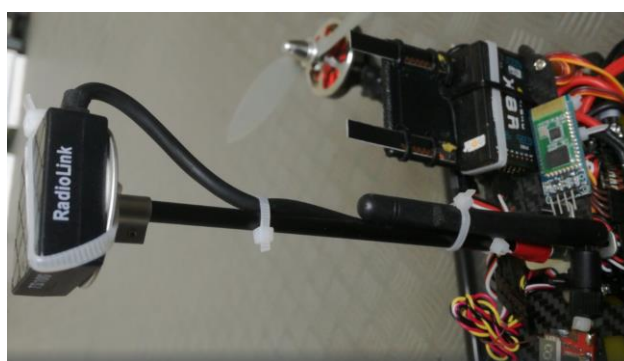
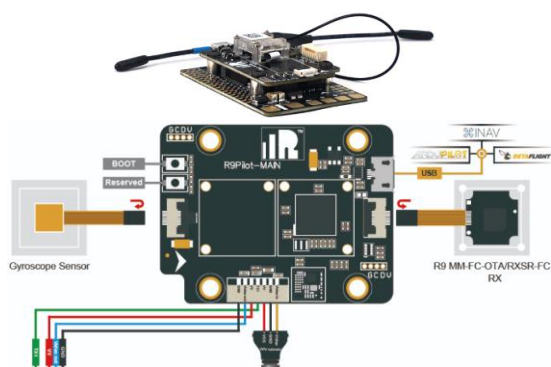
Първата платка има токов сензор с датчик на Хол и четири понижаващи преобразувателя (BEC<sub>1</sub>-3,3V/0,5A, BEC<sub>2</sub>-5V/1A, BEC<sub>3</sub>-5÷8V/5A BEC<sub>4</sub>-5÷9V/2A). Към нея по 54 извода може да се свърже периферия: GPS модул; магнитометър; 12 серво машинки; 2 аналогови входа и др.

Във втората платка (виж Фиг. 4б) се намират основният процесор и чипът за телеметрия OSD FrSky . Към нея може да се свържат: радиопредавател 5,8 GHz с протокол VTX; аналогова камера; конфигуратор по микро USB конектор; жirosкопен сензор и телеметричен модул, както и MicroSD карта за запис на бордната телеметрия (Black Box) с обем 4 GB.

Третата платка се свързва с лентов кабел (виж Фиг. 4б) и има два варианта:

- Модул за телеметрия на 4 до 16 канала работещ на честоти 915 MHz и 868 MHz (R9 MM-FC-OTA) на разстояние до 10 km. Има изходи на 16 канала по RSSI. Съвместими са три наземни модули за телеметрия: R9M Lite, R9M Lite Pro и R9M 2019 with ACCESS.
- Модул за управление и телеметрия (RXSR-FC RX) работещ на честота 2,4 GHz. Има изходи на 16 канала по F.Port и S.Port. Работи с наземни модули на две фирми: Taranis X9D/X9D Plus/X9E; Taranis Q X7; Taranis X-Lite и Horus X12S/X10.

Към R9/RXSR Pilot (виж фиг.4в) са свързани външни Bluetooth и WiFi модули, които комуникират с лаптоп или смартфон на земята с инсталиран софтуер на INAV - Configurator и INAV Mission Control. Така чрез възможностите на INAV дистанционно в процеса на полета в затворено помещение може: да се визуализират и записват параметри; да се управлява допълнително квадрокоптера от пилот-инженера (паралелно на ръчното управление на летеца); да се записват полетни характеристики и също така да се извършва предполетна подготовка.



Фиг. 4а,б,в Втора бордна част и квадрокоптер № 2 <https://www.frsky-rc.com/product/r9rxsr-pilot/>

Третата хардуерна част на бордния автопилот е дадена на Фиг. 5а,б.в. Използван е полетен контролер Pixhacer R15 (виж Фиг. 5а), който има 6 изхода за контролери на скоростта и се захранва от външен BEC-5 V. На Фиг. 1 се вижда монтиран и настроен комплектът от Фиг. 5б. С ArduPilot софтуер и протокол за комуникация Mavlink чрез външни модули за Wifi и Bluetooth са реализирани двупосочни връзки борд-земя. При няколко полета на борда на квадрокоптер №1 са записани в MicroSD карта над 100 летателни параметъра.

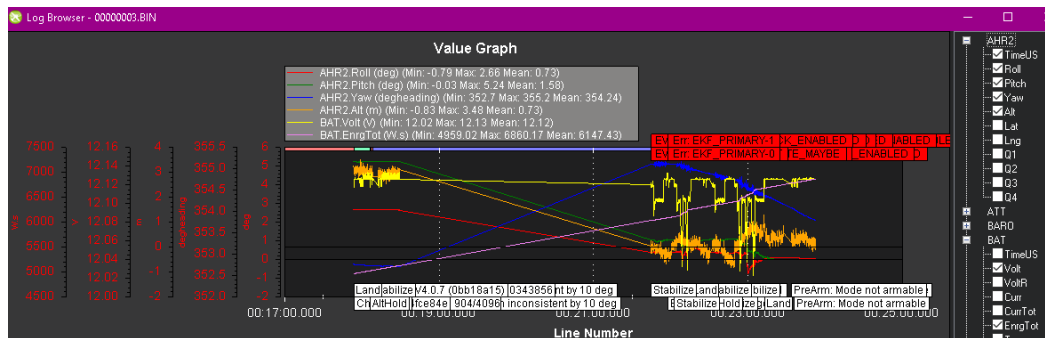
На Фиг. 5в е даден поглед отдолу, разписание на конекторите и слота за MicroSD карта.



Фиг. 5а,б.в Трета бордна част от <https://rccopter.ru/product/polyotnyy-kontroller-pixracer-mini-autopilot>

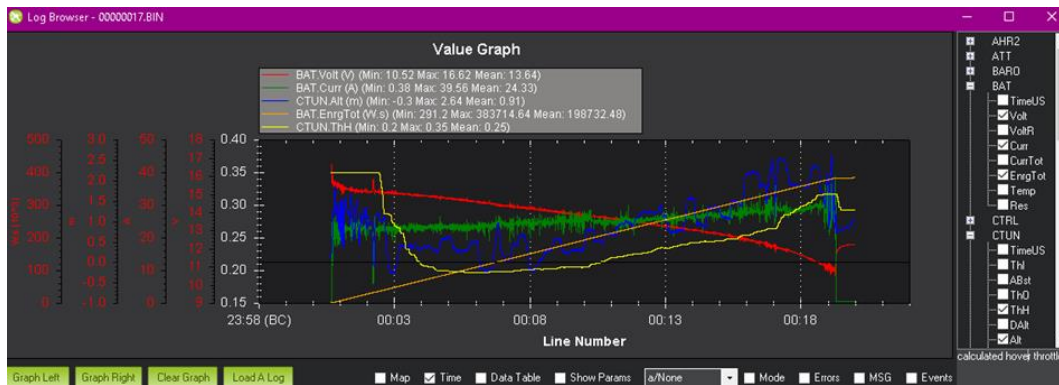
### Изследване на характеристиките на полета

На Фиг. 6 е даден полет №3, записан на бордната SD карта и прочетен от Mission Planner впоследствие. Цветовете на шест полетни параметъра са: 1) с червено е крен - Roll [deg]; 2) със зелено е тангаж - Pitch [deg]; 3) със синьо е курс - Yaw [deg]; 4) с оранжево е височина - Alt в [m]; 5) със жълто е напрежението на батерията - BAT.Volt [V] и 6) с лилаво е енергията на батерията - BAT.EnrgTot [W.s]. Забелязва се, че батерията в началото на полета е била 12,13 V, а в края е 12,02 V. Височината на полета е от 3,4 m в началото и -0,83 m в края на полета.



Фиг. 6. Полет №3 с продължителност 0,1 h на квадрокоптер №1 при 3S батерия

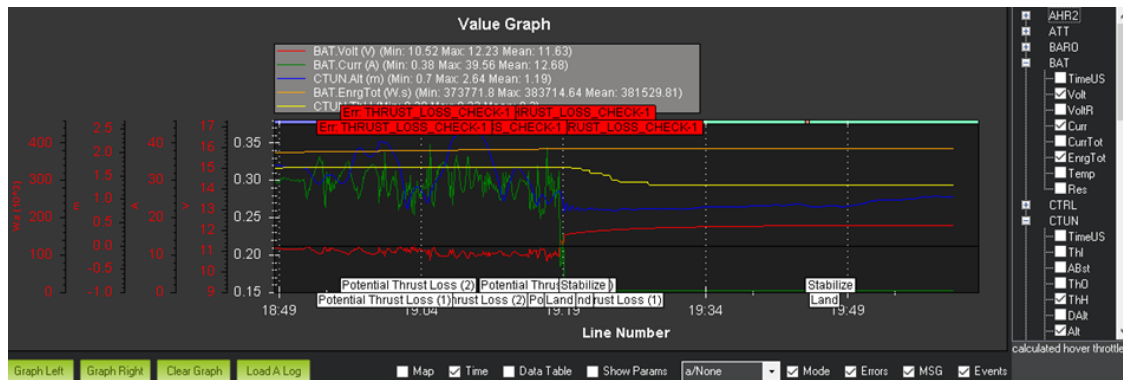
На Фиг. 7 е даден полет №17, от който са избрани четири параметъра: 1) с червено е напрежението на батерията BAT.Volt [V] (начално 16,62 V и минимално 10,52 V); 2) в зелено е токът на батерията BAT.Curr [A] (той е минимален при изключени двигатели 0,38 A, и максимален 39,56 A); 3) в синьо е височината на полета - CTUN.Alt [m] (начална при 0 m, минимална -0,25 m и максимална 2,65 m); 4) в оранжево е енергията на батерията - BAT.EnrgTot [W.s] и 5) в жълто е относителното положение на ръчката за газ - CTUN.ThH. Тя има следните стойности: при излитане е максимална 0,35; от пета до осма минута е минимална 0,20, а при кацане е висока 0,32 за да компенсира ниското напрежение на батерията.



Фиг. 7. Полет №17 на квадрокоптер №1 с продължителност 0,33 h при 4S батерия

За целия полет при среден ток 24,33 A и за средно напрежение на батерията 13,64 V се пресмята средната консумирана мощност 331,86 W за 0,33 h. При батерия, изпълнена като 4S3P от 12 броя акумулатори се получава средна енергия  $331,86 \cdot 0,33 / 12 = 9,126 Wh$  за всеки от тях. Нека батерията се състои от 12 броя Samsung INR18650-25R, за който производителят дава енергия 8,61 Wh при работен ток  $24,33 / 3 = 8,11 A$ . Тогава времето на полета ще се съкрати  $8,61 / 9,126 = 0,94$  или с 6 %. А батерия от 12 броя акумулатори Samsung INR21700-40T в същия режим ще даде  $14,16 \cdot 12 = 169,92 Wh$  и време за полет  $169,92 / 331,86 = 0,51 h$ , вместо  $8,61 \cdot 12 / 331,86 = 0,31 h$  при INR18650-25R. Методика за по-прецизно изчисляване на времето на полета ще бъде дадено в друга публикация на автора.

На Фиг. 8 е дадена лупа на Фиг. 7 от последната минута на полета. В 19,19 минута токът на батерията е нулев, а напрежението на батерията се вдига рязко от 10,8 V до 12,2 V, а енергията достига стойност 380 Wh и спира да расте, защото са изключени двигателите.



Фиг. 8. Кацане при полет №17 на квадрокоптер №1



Фиг. 9а,б,в,г Полет с INAV на квадрокоптер №1 и снимки от: 1,48; 9,33; 17,08 и 18,00 минута

	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)	N(Y)	O(Y)	P(Y)
Long Name	Trotle	JD-MR	JD-MR	JD-MR	APC	APC	APC	APC	APC	APC	JD-MR	JD-MR	JD-MR	JD-MR	JD-MR	JD-MR
мотор-репун	мотор-93rp	репун-40rp	3+40+21=15								репун-40rp	JD-MR	JD-MR	мотор-102rp	Taro2814	700kv
лепка	12x4,5	12x4,5	12x4,5	12x4,5	10x4,7	10x4,7	10x4,7	10x4,7	10x4,7	10x4,7	12x4,5	12x4,5	12x4,5	12x4,5	12x4,5	12x4,5
Parameters	24.5v	24.5v			24.5v						24.5v			14.3v	JD-MR	oneshoot
Units	%	gram	wat	gram/1wat	gram	wat	gram/1wat	gram	wat	gram/1wat	gram	wat	gram/1wat	gram	wat	gram/1wat
Comments		21gram		standart400	11gram	oneshoot	oneshoot	standart4	standart	standart400	21gram	oneshoot	oneshoot	21gram		
F(x)=				B/C			E/F			H/I			K/L			N/O
1	10	28tr=m+++	hp		--	25tr=m+++	--	--	--	--	--	--	--	29tr=m+++	102+40+281=163	--
2	12	33tr=2(m+++)	68w		--	34tr=2(m+++)	71w	--	--	--	--	--	--	39tr=2(m+++)	62w	--
3	14	43tr=4(m+++)	116w		--	48tr=4(m+++)	134w	--	--	--	--	--	--	49tr=3(m+++)	74w	--
4	16	51tr=6(m+++)	175w		--	58tr=6(m+++)	224w	--	--	--	--	--	--	--	--	--
5	18	7	34	0.20588	36	34.3	1.04966	22	33	0.66667	34	35	0.97143	19	17	1.11765
6	20	33	35	0.94286	65	37	1.75676	50	36	1.38889	62	37	1.67568	43	19	2.26316
7	22	80	39	2.05128	104	40	2.6	74	38	1.94737	89	39	2.28205	69	21	3.28571
8	24	98	41	2.39024	136	44	3.09091	110	42	2.61905	132	44	3	95	24	3.95833
9	26	134	45	2.97778	178	49	3.63265	140	46	3.04348	172	48	3.58333	126	27	4.65667
10	28	188	51	3.68627	210	53	3.96226	180	51	3.52941	220	54	4.07407	150	29.56	5.07442
11	30	240	57	4.21063	267	61	4.37705	223	57	3.91228	270	60	4.5	184	33	5.57576
12	32	288	63	4.57143	286	64	4.46875	272	64	4.25	320	68	4.70588	225	37.7	5.96817
13	34	350	72	4.86111	329	71	4.6338	308	70	4.4	372	75	4.96	242	40.4	5.9901
14	36	382	77	4.96104	375	79	4.74684	352	76	4.63158	428	83	5.15663	279	45	6.2
15	38	453	88	5.14773	422	87	4.85057	400	85	4.70588	483	92	5.25	316	49	6.44898
16	40	520	98	5.30612	470	96	4.89583	440	91.5	4.80874	552	104	5.30769	345	53.5	6.4486
17	42	582	110	5.29091	510	104	4.90385	480	99	4.84848	620	116	5.34483	382	58.5	6.52991
18	44	660	123	5.36585	560	113	4.95575	523	108	4.84259	685	130	5.26923	402	61.8	6.50485
19	46	695	130	5.34615	602	122	4.93443	580	118	4.91525	715	134	5.33582	431	66.7	6.46177
20	48	772	145	5.32414	652	134	4.86567	649	134	4.84328	803	151	5.31788	470	72	6.52778
21	50	878	166	5.28916	730	151	4.83444	680	140	4.85714	926	179	5.17318	495	76	6.51316
22	52	943	184	5.125	807	170	4.74706	755	157	4.80892	996	194	5.13402	--	--	--
23	54	1040	205	5.07317	860	181	4.75138	853	184	4.63587	--	--	--	--	--	--
24	56	--	--	--	920	198	4.64646	890	190	4.68421	--	--	--	--	--	--
25	58	--	--	--	1030	224	4.59821	980	214	4.57944	--	--	--	--	--	--
26	60	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Фиг. 10. Сравнение на ефективността на два вида двигателя и два вида пропелери

На Фиг. 9а,б,в,г са дадени четири скрийншота от видеозапис с формат .avi с аналогов телевизионен стандарт PAL. Така изглежда OSD FPV телеметрия 5,8 GHz с INAV. Избрани параметри на полета на Фиг. 9а,б,в са: напрежение на батерията 15,64 V/13,73 V/11,47 V; ток на батерията 18,1 A/18,8 A/21,4 A; използван капацитет на батерията 55 mah/2450 mah/49930 mah; консумирана текуща мощност 282 W/258 W/246 W; газ 49 %/52 %/55 %; сила на входния сигнал

RSSI на бордния радиоприемник на 2,4 GHz в проценти 99/99/99; режим на полета ANGL и други. Комуникацията до 2 km разстояние на квадрокоптер №1 се реализира на борда с FCHUB-6S PDB, а на земята с SKYDROID OTG Reciever. На фиг. 9г е даден отчет за параметрите на полета след кацане. На фиг. 10 е дадена таблица от OriginLab за зависимостта на тягата от вида на пропелерите (12x4,5 и 10x4,7) и от вида двигателите (93 g и 102 g). Сравняват се жълтата (при 24,5 V е 483 g//525 g/W) и оранжевата (при 14,3 V е 495 g//651 g/W) ефективности и се доказва, че при кацане  $651/525=1,24$  пъти по-добре се използва акумулаторът (паднал е от 24 V на 14 V). При сравнение на два режима на управление на контролера на скоростта (oneshoot в зелено и standart400 в лилаво) печалба от 1 до 2 процента дава oneshoot в ефективността при равни тяги.

### Заклучение

Направен е анализ на летателни и електрически параметри по време и след реален полет в затворено помещение. Записани са на борда и на земната станция важни параметри на полета. Реализирано е двустранно предаване на телеметрични данни по три различни радиоканала. За запис на над 100 летателни параметри на борда е използвана MicroSD карта като черна кутия. В наземната част на телеметричната система на лаптоп и смартфон са визуализирани и записани изображения от пилотската камера и OSD параметри на полета. За целта се използват радиоканали с носеща честота 2,4 GHz и 5,8 GHz, както и Bluetooth и WiFi мрежи.

### Благодарности

Изследванията са реализирани благодарение на съдействието на Първа Частна Експериментална Лаборатория за Аерокосмически Изследвания (ПЧЕЛАКИ) „Райт – Аероспейс” – ЕООД, <https://rait-aerospace.com/index.htm>. Оборудване по бордна и наземна част на квадрокоптер №1 и №2 са предоставени, монтирани и консултирани от инженер Райчо Тодоров, президент на ПЧЕЛАКИ. Ще се публикуват други данни от полети с квадрокоптер №1 и №2.

### Литература:

1. Frank Karg, Sascha Gefßler, Florian Flerlage. The iNAV Indoor Navigation System, International Symposium on Ubiquitous Computing Systems, UCS 2007: Ubiquitous Computing Systems pp 110–117  
DOI: 10.1007/978-3-540-76772-5\_9
2. Lienkov, S., A. Myasishev, L. Komarova, N. Lytvynenko, V. Shvab, O. Lytvynenko. Creation of a Rotor-Type UAV with Flight Controllers, Based On a ATmega2560 and STM32f405 Microprocessors. International Journal of Emerging Trends in Engineering Research. – 2020. – August, Vol. 8, No. 8. – P. 4703–4710.  
<https://doi.org/10.30534/ijeter/2020/104882020>.
3. Lienkov, S., A. Myasishev, O. Banzak, Y. Husak, I. Starynski. Use of rescue mode for UAV on the basis of STM32 microcontrollers. International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering. – 2020. – Vol. 9, No. 3, May – June. – P. 3506–3513.  
<https://doi.org/10.30534/ijatcse/2020/156932020>.
4. Nataliya Lytvynenko, Olexander Myasishev, Serhii Lienkov, Yuriy Husak, Ivan Starynskiy. Designing of the Aero Video Intelligence on the STM32H Microcontrollers Basis. Basis. International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE). – 2020. – Vol. 9, Iss. 8 (June). – P. 88–93.  
<https://doi.org/10.35940/ijitee.H6176.069820>
5. Alexandr Myasishev, S. V. Lienkov, L. A. Komarova, Ye. S. Lienkov. Features of use of rescue mode in Betaflight firmware for UAV on the basis of STM32F405 controller. Article in Collection of scientific works of the Military Institute of Kyiv National Taras Shevchenko University · January 2020  
<https://doi.org/10.17721/2519-481X/2020/67-02>
6. Alexandr Myasishev, PROGRAMMING ESC SIMONK-30A REGULATORS AND EMAX SIMON-12A THROUGH ARDUINO AND FLIGHT CONTROLLER, March 2019  
DOI: 10.31891/2307-5732-2019-271-2-228-237
7. Sverdlov, S. Z. Rate of Climb of Electric Multicopter. Mekhatronika, Avtomatizatsiya, Upravlenie. 2016;17(6):425–432. (In Russ.) <https://doi.org/10.17587/mau.17.425-432>
8. Сврдлов, С. З. Статический потолок электрического мультикоптера. Инженерный журнал: наука и инновации #10(82)/2018 DOI: 10.18698/2308-6033-2018-10-1808
9. Сврдлов, С. З. Выбор оптимального аккумулятора для многороторного беспилотного вертолета (мультикоптера). Инженерный журнал: наука и инновации #5(65)/2017  
DOI: 10.18698/2308-6033-2018-10-1808
10. Сврдлов, С. З. Оптимальный вертикальный подъем электрического мультикоптера. Инженерный журнал: наука и инновации #11(59)/2016 DOI: 10.18698/2308-6033-2016-11-1551
11. Сотиров, Г., Е. Хубенов, З. Чифлиджанова. Формиране и изследване на интелигентна интегрирана мобилна система за мониторинг на критична инфраструктура, Sixteenth International Scientific Conference SPACE, ECOLOGY, SAFETY 4–6 November 2020, Sofia, Bulgaria, pp. 144–149
12. Хаджиев, Й., Христиан Панайотов, Димо Зафиров. Изследвания за реализация на автономен полет на безпилотен летателен апарат. BulTrans-2014. Sozopol. 17-19 September 2014