

Jarosław SULKOWSKI, Janusz BŁASZCZYK, Adam GRZYBOWSKI, Kacper KARCZ, Paweł KOWALECZKO Air Force Institute of Technology (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych)

BADANIA PODATNOŚCI BEZZAŁOGOWYCH STATKÓW POWIETRZNYCH NA INTENSYWNE PROMIENIOWANIE MIKROFALOWE

Investigations of the susceptibility of unmanned aerial vehicles on intensive microwave radiation

Streszczenie: Komercyjnie dostępne bezzałogowe statki powietrzne (BSP) oraz części i podzespoły umożliwiające konstrukcję drona stają się coraz szerzej dostępne, a ich osiągi stale się poprawiają. Obecne możliwości drona skonstruowanego przez hobbystę predysponują go już nie tylko do roli narzędzia rozpoznania, lecz również sprawiają, że można wykorzystać go jako kierowany pocisk. Zastosowanie w pojeździe kamery wraz z nadajnikiem strumienia wideo i użycie gogli wirtualnej rzeczywistości z odbiornikiem strumienia wideo daje pilotowi wrażenie przebywania na pokładzie drona, co umożliwia mu sterowanie z niesłychaną precyzją, nawet przy dużych prędkościach. W artykule przedstawiono wyniki badań mających na celu określenie stopnia oraz typu uszkodzeń spowodowanych narażeniem drona na intensywne promieniowanie mikrofalowe.

Słowa kluczowe: bezzałogowe statki powietrzne (BSP), dron, HPM, odporność na narażenie EM.

Abstract: Commercially available drone type unmanned aerial vehicles (UAV), as well as parts and subsystems enabling the assemble of UAVs, are becoming more and more widely available, and their performance is constantly improving. The current possibilities of a drone assembled by a hobbyist predispose are not only to be used as a reconnaissance tool but also as a guided missile. The use of a camera with a video stream transmitter simultaneously with virtual reality goggles and video stream receiver gives the pilot an impression of being on the drone, which makes it possible to control it with extreme precision, even at high speeds. The article presents research aimed at determining the extent and type of damage made on exemplary racer drone caused by intense microwave field radiations. **Key words**: unmanned aerial vehicles (UAV), drone, HPM, EM radiation susceptibility.

1. Bezzałogowe statki powietrzne typu dron

Bezzałogowe statki powietrzne są coraz częściej stosowane do zadań cywilnych, jak i wojskowych. Ich główną zaletą są niewielkie rozmiary oraz możliwość zdalnego sterowania nimi, nawet z bardzo dużych odległości. Jednym z rodzajów bezzałogowych statków powietrznych są drony – niewielkie, kilkuwirnikowe statki powietrzne charakteryzujące się dużą dynamiką zmian kierunku lotu oraz możliwością stabilnego zawisu w powietrzu. Prędkości, które rozwijają drony, dochodzić mogą nawet do setek kilometrów na godzinę. Niewielkie rozmiary oraz stosunkowo cicha praca umożliwiają stosowanie ich w celach obserwacyjnych czy wywiadowczych.

Przechwycenie wrogich dronów stanowi wyzwanie technologiczne o rosnącym uzasadnieniu. Jedną z możliwości jest użycie drugiego drona wyposażonego w siatke, przy użyciu której można przechwycić wrogiego drona. Jednak próba przechwycenia małego, zwrotnego obiektu poruszającego się w powietrzu z dużą prędkością ma małą szansę powodzenia. Aby przechwycenie się powiodło, operator musi być w gotowości dokładnie w momencie, w którym mijać go będzie obcy dron, ponieważ sama siatka znacznie zaburza dynamikę lotu i uniemożliwia pościg. Przy prędkościach przelotowych rzędu setek kilometrów na godzinę i rozmiarach korespondujących z długościami fali promieniowania radarowego (pasma L: $\lambda = 15 - 30$ cm i pasmo S: $\lambda = 7.5 - 15$ cm) wykrycie nadlatującego drona konwencjonalnymi wojskowymi radarami obserwacyjnymi lub systemami kontroli ruchu powietrznego jest praktycznie niemożliwe. Udaje się co prawda uzyskiwać skuteczne wykrycie radarami obiektów tych rozmiarów przy przejściu do pasm o krótszej fali (pasmo C: $\lambda = 3.75 - 7.5$ cm lub X: $\lambda = 2.5 - 3.75$ cm) i zwiększeniu czułości odbiornika, jest jednak nieuchronne, że zwiększenie czułości jednocześnie zwiększy liczbę fałszywych alarmów. Efektem małej skutecznej powierzchni odbijającej miniaturowych dronów jest mała odległość, na której możliwe jest jego skuteczne wykrycie, siegająca nieznacznie powyżej kilometra. Szybkie drony typu racer osiągają prędkości około 150 km/h, chociaż te najszybsze mogą osiągać prędkości nawet 200 km/h, co w zestawieniu z zasięgiem skutecznego ich wykrycia powoduje, że czas reakcji musi się mieścić w przedziale 1–2 minut [1].

Inną możliwością jest nakierowanie na wrogiego drona wiązki promieniowania mikrofalowego, która zaburzy jego pracę lub też spowoduje jego trwałe uszkodzenie. Jest to rozwiązanie znane pod nazwą HPM (z ang. *High Microvawe Pulse*). Właściwości promieniowania mikrofalowego: rozbieżność wiązki oraz prędkość propagacji zaburzenia elektromagnetycznego skutkują odpowiednio niewrażliwością na nagłe zwroty i uniki drona oraz możliwością śledzenia wiązką nawet najszybszego drona. Celem pracy było zbadanie wpływu promieniowania elektromagnetycznego na działanie bezzałogowego statku powietrznego (z ang. *unmanned aerial vehicle*, UAV), jakim jest dron. Założenia przeprowadzonych badań zawierają:

- zbadanie wpływu udarowego sygnału EM przy zmiennych parametrach na ewentualne uszkodzenia systemu (składowej systemu),
- wywołanie wadliwego działania systemu lub jego podzespołu,
- zakłócenie sygnałów wewnętrznych systemu.



Rys. 1. Przykładowy dron [2]

2. Dron wykorzystywany w badaniach

Zgodnie z założeniami projektowymi badany dron należy do klasy najmniejszych komercyjnie dostępnych bezzałogowych statków powietrznych. Posiada on również możliwie najprostsze systemy orientacji przestrzennej oraz możliwie najprostszą strukturę ideową systemu, składającą się z:

- zintegrowanej platformy kontrolera pokładowego Naze32 rev6 6DOF,
- modułów ESC (z ang. *Electronic Speed Controller*) sterowników silników BLDC,
- silników BLDC (z ang. Brushless DC) marki ECO model 2206X,
- odbiornika sygnału zdalnego sterowania firmy *FlySky*, model FS-A8S,
- kontrolera zdalnego sterowania firmy *FlySky*, model FS-i6S,
- ogniw litowo-jonowych 3S (11.4V) 1300 mAh marki TATTU,
- ramy wykonanej z tworzyw sztucznych marki RCConcept Flying Technology.

W założeniu dron w całości miał się składać w jak największym stopniu z przeźroczystych dla promieniowania mikrofalowego tworzyw sztucznych. Aby uniknąć przypadkowego ekranowania lub skupiania wiązki, z metalu wykonane są jedynie elementy elektroniczne, a całość konstrukcji strukturalnej (z wyłączeniem śrubek spajających elementy ramy) wykonana jest z polimerów.

Płytka sterująca Naze32

Sercem systemu jest popularna płytka sterująca Naze32 rev6 6DOF (w wersji szóstej) [5]. Powoduje to, że układ elementów i ścieżek jest w tej iteracji układu zoptymalizowany pod kątem niezawodności podzespołów. Sercem płytki jest mikrokontroler STM 32 F1 w architekturze ARM Cortex M3 – RISC pracujący z taktowaniem zegara o częstotliwości 72 MHz [3]. Mikrokontroler posiada wbudowaną pamięć nieulotną typu flash o pojemności 128 KB, oraz pamięć buforującą SRAM o pojemności 20 KB, co zaznaczono na rys. 2. Schemat z rys. 2 pokazuje również częstotliwości taktowania poszczególnych magistrali i peryferiów obecnych w mikrokontrolerze. Wszystkie wykorzystywane w tej konkretnej implementacji peryferia znajdują się jednak na dwóch magistralach o taktowaniach 48/72 oraz 24/36 MHz. Magistrala APBH2 (48/72MHz) obsługuje porty GPIO(A...E), które płytka Naze32 wykorzystuje do obsługi ESC. Odbiornik komunikuje się z komputerem za pomocą interfejsu UART dostępnego na porcie UART2, który znajduje się na magistrali APBH1 o taktowaniu zegara 24/36 MHz. Port UART2 pracuje w trybie Serial RX, pozwalającego odczytywać sygnał PPM z odbiornika RC.

Zastosowany czujnik przyspieszenia to procesor ruchu firmy Invensense model MPU6000 podłączony z mikrokontrolerem przez magistralę SPI pracującą z częstotliwością zegara taktującego równą 1 kHz. MPU6000 zawiera: 3-osiowy czujnik prędkości kątowej oraz 3-osiowy czujnik przyspieszenia linowego [6].

Płytka Naze32 wykorzystuje również czujnik ciśnienia do określania swojej względnej wysokości. Realizuje to układem firmy TE Conectivity model MS5611-01BA03 połączonym z mikrokontrolerem przez magistralę I2C [7]. Pomiar położenia wertykalnego drona realizowany jest na podstawie założenia, że każdy spadek ciśnienia o 1 mbar to wzrost wysokości o 10 cm.

W przypadku zaburzenia pracy drona poprzez impuls promieniowania elektromagnetycznego nieniszczącego fizycznie układów drona (*softkill*) nie należy się spodziewać zakłócenia stanów logicznych magistrali danych obecnej w mikrokontrolerze. Jest to mało prawdopodobne, ponieważ gdy indukowane narażeniem HPM potencjały będą wynosić pojedyncze wolty, to prawdopodobieństwo wystąpienia znaczącego wypadkowego potencjału w linii skonstruowanej w taki sposób, aby minimalizować zakłócenia przebiegu sygnałami zewnętrznymi, jest znacznie mniejsze niż rezonansowe wzbudzenie przypadkowych pojemności i indukcyjności występujących w nieekranowanych mikroukładach.



Rys. 1. Schemat blokowy mikrokontrolera STM32 F1 [3]

Stosowanie modulacji sygnału narażania powoduje zwiększenie prawdopodobieństwa wystąpienia wzbudzenia rezonansowego w układzie. Częstotliwości rezonansowe prawdopodobnie odpowiadać będą pojemnościom kondensatorów wykorzystywanych jako filtry dolnoprzepustowe części logicznych i pasożytniczych indukcyjności. Rezonans napięciowy jest predysponowany do wystąpienia w przypadkowych miejscach układów elektronicznych poddanych narażeniu promieniowaniem mikrofalowym jako ze taki rezonans występuje w obwodach szeregowych. Rezonans ten spowodowany byłby najprawdopodobniej pojemnością lub wypadkowa pojemnością w danym punkcie kondensatorów filtrujących i pasożytniczej indukcyjności ścieżek mikroukładów. Impedancja szeregowego obwodu LC jest równa zero gdy reaktancje cewki XL i kondensatora XC są sobie równe co do wartości bezwzględnej. Zatem należy się spodziewać, że w tym wypadku częstotliwości będą leżeć w zakresie o około rząd większym od rzędu częstotliwości, z którą pracują podzespoły części logicznej drona.

3. Laboratorium badawcze i układ pomiarowy

Pomiary wpływu promieniowania elektromagnetycznego na opisanego we wcześniejszym rozdziale drona przeprowadzone zostały w Laboratorium Badań Kompatybilności Elektromagnetycznej i Pomiarów Pól Elektromagnetycznych (LBEMC), wchodzącego w skład Wojskowego Instytutu Technicznego Uzbrojenia w Zielonce. Badania były prowadzone w zakresie częstotliwości promieniowania 200 MHz – 18 GHz oraz dla natężenia promieniowania 10, 20 i 50 V/m [4]. W zależności od aktualnie zastosowanego natężenia promieniowania i badanego pasma używane były odpowiednie anteny oraz wzmacniacze.

W celu przeprowadzenia pomiarów zaprojektowana i zbudowana została specjalna klatka, której zadaniem było utrzymanie drona w konkretnym położeniu, dając mu jednocześnie pewną swobodę ruchu i ustabilizowanie jego położenia w wypadku wystąpienia zaburzeń pracy. Klatka ma kształt prostopadłościanu o wymiarach 1,5 x 1,5 x 3 m i wykonana została z rur PVC. Powodem wykorzystania rur PVC była konieczność uniezależnienia wyników eksperymentu od zmiennych środowiskowych, jako że polimer - polichlorek winylu oddziałuje w znikomym stopniu z zastosowanym promieniowaniem mikrofalowym [8]. W konstrukcji nie zostały użyte żadne elementy metalowe – ich obecność w układzie eksperymentalnym mogłaby wprowadzać zależne od danej częstotliwości odbicia i dyfrakcje promieniowania. Dron umieszczany był wewnatrz klatki, a następnie ustawiany w miejscu, w którym pozycjonowano sondę wykorzystywaną podczas kalibracji układu narażania, w odległości jednego metra od anteny emitujacej promieniowanie. Ustawienie takie umożliwiały liny w prowadnicach po obu stronach drona. Dzieki temu możliwe było precyzyjne ustawienie go na zadanej wysokości. W celu precyzyjnego pozycjonowania drona na odpowiedniej wysokości w trakcie narażeń zmodyfikowano kontroler w taki sposób, że manipulator predkości obrotów silników (ciągu w osi wertykalnej) pozbawiony został układu spreżynującego, przez co nie posiadał pozycji neutralnej i umożliwiał dobór obrotów wirników tak, aby dron pozostawał na zadanej wysokości.



Rys. 2. Układ eksperymentalny



Rys. 3. Obserwacja drona z zewnątrz komory

W czasie pomiarów możliwe było obserwowanie wnętrza komory przy użyciu umieszczonej w niej kamery. Obraz transmitowany był na monitor stanowiska pomiarowego znajdującego się poza komorą.

4. Wyniki badań

Ze względu na pojemność akumulatora zasilającego drona jednorazowy pomiar mógł trwać maksymalnie 6 minut. Dłuższy czas pomiaru powodowałby ryzyko, że nieprawidłowa praca drona nie jest skutkiem wpływu promieniowania elektromagnetycznego tylko rozładowania akumulatora zasilającego. Po upłynięciu 6 minut pomiar był zatrzymywany, a akumulator był wymieniany na naładowany.

Dla danego pasma częstotliwości i danej mocy niezbędne było przeprowadzenie wcześniej pomiaru kalibracyjnego. Pomiar przeprowadzany był osobno dla orientacji horyzontalnej i wertykalnej anteny. Zadana moc promieniowania osiągana była na wysokości anteny w odległości jednego metra od niej. Promieniowanie mogło być emitowane również z modulacją prostokątną o wypełnieniu 50%.

Wpływ promieniowania na drona można podzielić na dwa typy – wpływ długotrwałego oraz krótkotrwałego napromieniowania. Przykłady zachowań drona odpowiadających tym wpływom przedstawiono poniżej.

Efekty długotrwałe:

- nierównomierna praca silników powodująca przechylanie drona w pewnym kierunku,
- problemy z komunikacją drona z kontrolerem.

Efekty krótkotrwałe:

- nagłe zmiany obrotów w silnikach powodujące gwałtowne zrywy drona na boki,
- gwałtowne opadanie lub wznoszenie drona,
- powolne opadanie lub wznoszenie drona,
- wyłączenie drona,
- utrata komunikacji z dronem.



Rys. 4. Długotrwały wpływ oddziaływania promieniowania na drona – stałe wychylenie drona

Nagłe zrywy drona potrafiły doprowadzić do jego fizycznego uszkodzenia – kilkakrotnie śmigła drona zostały połamane. Wpływ długotrwały spowodowany był zapewne przeprogramowaniem niektórych komórek pamięci drona – po ponownym wgraniu sterowników do drona ten znów działał prawidłowo. Zabieg taki był niezbędny, ponieważ po pewnym czasie naświetlania dron nie nadawał się do prowadzenia dalszych badań.

Opisane zostaną tylko pomiary dla mocy 50 V/m – dla mniejszych mocy zawężał się zakres częstotliwości, dla których obserwowano oddziaływanie promieniowania na drona. Wpływ ten cechował się zmniejszoną intensywnością reakcji. Należy zaznaczyć, że w zasadniczej większości przypadków wpływ był obserwowany tylko wtedy, gdy wiązka promieniowania podlegała modulacji. Na poniższym wykresie przedstawiony został obserwowany wpływ krótkotrwały promieniowania na pracę drona w zależności od częstotliwości promieniowania. Wartości 1 oznaczają zaobserwowanie wpływu, natomiast 0 – brak wpływu.



Rys. 5. Krótkotrwały wpływ promieniowania na pracę drona w zależności od częstotliwości promieniowania o natężeniu 50 V/m

Jak widać, polaryzacja promieniowania ma wpływ na działanie drona – zakresy częstotliwości, dla których zaobserwowany został wpływ promieniowania na pracę drona różnią się między sobą w zależności od polaryzacji.

Kolejne pomiary przeprowadzono dla obydwu polaryzacji dla pasm 1-8 GHz oraz 8–18 GHz, jednak wpływ promieniowania na drona nie został zaobserwowany dla częstotliwości wyższych niż około 2,3 GHz.



Rys. 6. Krótkotrwały wpływ promieniowania na pracę drona w zależności od częstotliwości promieniowania o natężeniu 50 V/m

Jak widać na powyższym wykresie, dla obydwu polaryzacji pasma, w których obserwuje się wpływy promieniowania na drona, w pewnym stopniu się pokrywają. Wpływ promieniowania na zachowanie drona obserwowany dla częstotliwości pomiędzy 2–2,5 GHz wynika zapewne z zakłócenia komunikacji, która jest w paśmie 2,3 GHz. Wpływ zaobserwowany dla pozostałych pasm wynika z podatności komponentów, z których składa się dron, na takie częstotliwości promieniowania.

Podczas prób osiągnięto niekontrolowany ruch drona w górę klatki oraz szarpanie na boki. Efekt ten był mniej lub bardzie dynamiczny. Niekiedy wydawało się, że silniki zaczynały pracować na najwyższych dostępnych obrotach. Podejrzewa się, że za wystąpienie tego efektu odpowiada zakłócenie czujnika przyśpieszenia (akcelerometru MPU6000).

Osiągano również powolne lub natychmiastowe opadanie drona. W tym wypadku podejrzewa się zakłócenie pracy barometru (MS5611-01BA03) na płytce sterującej. Osiągany *softkill*, który uniemożliwiał dalszą pracę z dronem bez ponownego zaprogramowania układów, spowodowany był zmianą parametrów sterowników silników – ESC. Parametry (PPM min Throttle – rys. 7, 8) zapiane są w pamięci EEPROM. Każdy ze sterowników powinien mieć ustawioną minimalną wartość PPM Throttle na 1020 us.

Opisane powyżej badania pozwalają na stwierdzenie, że wiązka promieniowania elektromagnetycznego o odpowiednim natężeniu umożliwia skuteczne unieszkodliwienie wrogiego drona. Badania podatności bezzałogowych statków powietrznych na intensywne promieniowanie...

0		Programming by TX	Normal • Mozor Direction
or		Closed Loop Mode	1020 µs 2954 Min Throate
00		MotorGam	1960 ps DMM Max Throwto
0.75		Startup Power	
)		Temperature Protection	PLASH VIRKOVERIE
	,	PWM Output Dither	
		Low RPM Power Protocolon	ESC 2 013 30206, 143
		Brake on Stop	Normal Mutor Direction 1020 us
0%	•	Demag Compensation	PPM Man Thronie
ampedLight	.,	Pwill Prequancy/Damped	PPM Max Throthe
		Enable PKIM input	FLASH FIRMWARE
ledium	•	Moto: Timing	
^a ositive		Input Polanty	ESC 3: DYS SN2DA, 14.9
		Beep Strength	Normal • Manar Givernan
		Bracon Strength	PMMMI TROUE
10 minutes		Beacon Delay	1980 µ5

Rys. 7. Plik konfiguracyjny: BLHELI z pamięci EEPROM. Ustawienia poprawne

common Parameters	3		CENER OF STREET	SN20A, 14.9				
8		Programming by 1K	Normal		Motor Direction			
Off	•	Closed Loop Mindle		ê	PPM Min Throttle			
1.00	•	Motor Gam		6	PPM Max Throatte			
0.75	•)	Startup Power						
85.		Temperature Protection		PLACE FIRMS	WARE J			
£	• }(PWM Curput Dilher	Contraction of the local division of the loc					
6		Low RPM Power Protection	ESC 2: DYS	SN20A, 14.9	and the second second second			
8)		Brake on Stop	Normal	105	 Motor Direction. 			
Low	•	Demag Compensation			PIM Min Thruttle			
DampodLight	•](PMM Frequency/Demped			PHM Max Throttle			
3		Enable PWM input		FLASH FIRMU	WARE			
Medium	•	Motor Tinting			0			
Positive	•1(input Polarity	ESC 3- DYS	SN20A, 14.9				
40		River Strength	Normal		· Manine Department			
- 80		perio se al la se	4020 µs		Mage Company			
-		Bak on through	•		PPM Min Theattle			
		Devicen Delay			PPM Max Throttle			
10 minutes ve Debug Log common Parameters	•/)		ESC 1: DYS	SN20A, 14.9		Flash All	Write Setup	Read Se
10 minules ive Debug Log Common Parameters	•,))		ESC 1: DYS	SN20A, 14.9		Flash All	Write Secup	Read Se
10 minules ive Debug Log Common Parameters c	•))	Programming by TX	ESC 1: DVS Normal	SN20A, 14.9	Motor Exection	Flesh All	Write Setup	Read Se
10 minutos ive Debug Log Common Parameters e Off	•	Programming by TX Closed Loop Mide	ESC 1: DVS Normal	SN20A, 14.9 25	Moth: carection PPM Win Throattle	Flesh All	Write Setup	Read Se
10 minutes ve Debug Log Common Peremisters 6 Off 1 00		Programming by to Cleared Long Mide Mont Gain	ESC 1: DYS Namal 115	SN20A, 14.9 25	Motor Carection PPM Mon Throattle Informatile PPM Main Throattle	Flesh All	Write Secup	Read 5
to minutes we Debug Log common Parameters 6 com 1 00 2 75	· ·	Programming by the Choed Long Mode More Gam Stimup Power	ESC 1: DVS Namal	SN20A, 14.9	Motta: Carection PPM Vion Throatte 1960 pn PPM Mite Throatte toope	Flesh All	Write Secup	Read S
10 minutes ve Debug Log Common Persmitters 1 Ciff 1.00 0.75	• • • •	Programming by Kr. Cleared Long Mole Mont Gain Starting Phane Programs Programs	ESC 1: DVS	SN20A, 14.9 25 FLASH FIRMU	Moth: Direction PPW Win Throttle INFO JR PPM Mile Throttle MARE	Flash All	Write Secup	Read S
10 mmdes we Debug Log amman Parameters 6 00ff 1.00 0.75 7	· ·	Programming by 14 Closed Loop Mode Mean Cool Saling Power Mengensize Presenta Mid Classical Streem	ESC 1: DVS	SN20A, 14.9 25 FLASH FIRMS	Moth: Direction PRV Wn Throttle INFO JR Moth: Throttle Moth: Throttle MARE	Flesh All	Write Secup	Read S
10 minutes ve Debug Log common Peremisters 6 1.00	•	Programming by tax Closed Loop Mode Mont Guin Samap Prever Hengestanak Protection Field Corput Other Loop Market Protection	ESC 1: DVS Normal 1115 ESC 2: DVS	SN20A, 14.9 25 FLASH FIRM SN20A, 14.9	Motor Direction POW Win Investig 1960 pr Priva Max the color wafte	Flash All	Write Secup	Read S
10 minutes ve Debug Log common Parameters 6 100 075 7 6 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	•	Insglaatstong by to: Closed Loop Mode More Can San ya Power Nengenson-Insteed Niki Cango State Liver MM Nave Francisco Liver MM Nave Francisco	ESC 1- DVS	SN20A, 14.9 25 FLASH FIRM SN20A, 14.9 215	Motor Darection PPR Vin Ihrottle INO Ja Motor Darection Motor Darection	Flash All	Write Secup	Read S
Ve Debug Log animati Páramstera animati Páramstera animati Páramstera animati Animati Animati animati Animati	•	Programming by Yz Claned Long Mode Claned Long Mode Sarrug Power Sarrug Power Network Protection Network Composition Law STM Annuel Protection Network on Yosp Learning L annuel Power	ESC 1- DVS Normal TSS ESC 2- DVS Normal TSS Normal	5N20A, 14.9 95 FLASH FIRM 5N20A, 14.9 245	Wats Datedan Park Kan Heada Wats Datedan Park Kan Heada Kotar Datedan Motor Datedan Motor Datedan Motor Datedan	Flesh All	Write Secup	Read 5
Ve Debug Log common Parameters 6 00 1 00 0 75 7 7 6 1 9 7 7 6 9 1 9 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	•	Programming by 1x Closed unit Mote More Soft Samue Power Immersive Interestion Interest The Interest Inter Mail Power Instanction Intel Inter State Interest	ESC 1: DVS Normal ISS ESC 2: DVS Normal ISS Normal ISS	5N20A, 14.9 25 FLASH FIRM 5N20A, 14.9 24F	Moth: Constion PPA Kits Preside Water Preside Water Dawgitize Water Dawgitize PPA Kits Threads Istigge PPA Kits Threads Istigge PPA Kits Threads	Flesh All	Write Secup	Read 5
10 minutes ve Debug Log ommon Peremeters off 100 100 100 100 100 100 100 1	• • • •	Programming by tax Closed Loop Mode Mont Guil Sampe Prever Prof Cargos Carbon Territor Markawer Pranciscon Mode on Stop Jerritor (Cargos Carbon Heade on Stop) Jerritor (Cargos Carbon Heade Profit Nergui Carbon	ESC 1: DVS Normal ESC 2: DVS Normal	5N20A, 14.9 25 FLASH FIRM 5N20A, 14.9 215 FLASH FIRM	Moth: Carection PPM Van Threads Hill pan "mm Value Threads Water Direction "ANA Threads Hill pan The Value Threads Hill pan The Value Threads Hill pan	Fiesh All	Write Secup	Read 5
Ve Debug Log common Paremeters 1 00 1 00 1 00 1 00 1 00 1 00 1 00 1 0	* * * * *	Insglantoning by tax Closed Loop Motor Samup Power Yerngename Netwension 1944 Carpa Cather United in strap united in strap united in strap united in strap united in strap united in strap	ESC 1- DVS	59204, 14.9 45 TLASH FIRM 59204, 14.9 ELASH FIRM	Math: Direction PPM Main Threatile PPM Main Threatile PPM Main Threatile Water Direction PPM Main Threate PPM Main Threate PPM Main Threate Maine	Flash All	Write Secup	Read S
Ve Debug Log common Parameters 6 100 255 7 6 255 7 6 255 7 6 255 7 6 255 7 6 255 7 6 255 7 6 255 7 7 6 255 7 7 6 255 7 7 6 255 7 7 8 255 7 7 8 255 7 7 8 255 7 7 7 8 255 7 7 8 255 7 7 7 8 255 7 7 7 7 8 7 7 7 7 8 7 7 7 7 7 7 7 7 7	•	Programming by 1% Closed unity Mode Meter Gain Starlup Power Mengenzium Protection Starlup Competition Make an organization Provide Programming Provide Programming Analysis Competition Provide Provide Provi	ESC 1: DVS Normal ISS ESC 2: DVS Normal ISS ESC 2: DVS	551204, 14.9 25 7LASH/TIEMT 51204, 14.9 7LASH/TIEMT 51204, 14.9	Matter Connection Print Main Treatment Print Main Treatment Print Main Treatment Matter Eleventure Print Main Treatment Print Main Treatment Print Main Treatment Print Main Treatment AARE	Flesh All	Write Social	Read S
10 minutes ve Debug Log common Parameters 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0	•	Programming by tax Closefung Mote Maning Prever Engleman Preversion United Tables Preversion United in Table Law BM Prever Projection Indea on Table United Preversion Writig Interguistation United Preversion Enable Preversion Enable Preversion Enable Preversion	ESC 1: DVS	54,204, 14.9 25 71451 FIBM 54,204, 14.9 71451 FIBM 54,204, 14.9	Moto: Caraction PPA Kits Proteits Wate: Proteits Wate: Proteits Wate: Dawnide PPA Kits Proteits PRA Kits Proteits Nate: PPA Kits Proteits Nate: Voine: Dawnide	Fleeh All	Write Setup	Read S
10 minutes ve Debug Log common Persmeters com or 5 7 7 7 7 8 9 100 0 7 7 8 9 100 0 7 7 8 9 100 0 7 100 0 7 100 0 7 100 0 100 10	•	Inspanning by to Capacitions by to More Call Sampe Prever Hengestatus Prever Hengestatus Prever Hengestatus Henges	ESC 1: DVS Normal ESC 2: DVS Normal ESC 2: DVS Normal ESC 2: DVS Normal ESC 2: DVS	59/204, 14.9 22 71.434 FIBM2 59/204, 14.9 71,454 FIBM2 59/204, 14.9	Moth: Carendon PPA Van Threads Mota: Threads Mota: Threads TARE Mota: Threads TARE PPA Van Threads PPA Van Threads Marc Threads	Flesh All	Write Setup	Read S
10 minutes ve Debug Log common Parametars 6 Com 160 0 150 15	•	Insglantoning by tax Closed Loop Mole More Sain Sainge Power View Carper View Carper Street View Carper Stre	ESC 1: DVS Normal ESC 2: DVS Normal ESC 2: DVS Normal ESC 4: DVS Normal ESC 4: DVS	59,204, 14.9 25 71,454 / JEM 59,2204, 14.9 71,454 / JEM 59,2204, 14.9	Matter Carection PAN Main Threads Marker Darection Marker Darection Marker Darection Marker Darection PAN Main Threads Marker PAN Main Threads Marker PAN Main Threads	Flash All	Write Secup	Read S

Rys. 8. Plik konfiguracyjny: BLHELI z pamięci EEPROM. Ustawienia zmienione w wyniku narażenia

5. Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzone zostały badania jakościowe wpływu promieniowania elektromagnetycznego na pracę drona. Dla wartości natężenia promieniowania 50 V/m określone zostały częstotliwości, dla których zaobserwowany został wpływ na pracę drona. Parokrotnie osiągnięto tak zwany *softkill*.

Dla mniejszych mocy pasma te zmniejszały swoją szerokość bądź zanikały. Zaobserwowany został również wpływ długotrwałego napromieniowania drona – nierównomierna praca silników. Efekt ten można było usunąć tylko poprzez ponowne wgranie programu sterującego do drona. Nie zostało natomiast zauważone jakiekolwiek trwałe fizyczne uszkodzenie drona (*hardkill*), które wymagałoby wymiany podzespołów.

6. Literatura

 GearBest. SwellPro Swift 2 220mm FPV Racing Drone - RTF - COLORMIX. [Online] [Zacytowano: 2018-03-08.]

https://www.gearbest.com/multi-rotor-parts/pp_606368.html.

- 2. Bhphotovideo. Mvic Pro [Online] [Zacytowano: 2018-12-18.] (https://www.bhphotovideo.com/c/product/1285011-REG/dji_cp_pt_000500_mavic_pro.html)
- 3. STM elektronics. STM32F103x8 datasheet [Online] [Zacytowano 2018-12 -18] (https://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00161566.pdf)
- Mazzola S., "MIL-STD-461: The basic military EMC specification and it's evolution over the years," 2009 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference, Farmingdale, NY, 2009, pp. 1-5. doi: 10.1109/LISAT.2009.5031566
- 5. Naze32 Rev6 Flight controller manual [Online] [Zacytowano: 2018-12-18.] https://qu-adquestions.com/Naze32_rev6_manual_v1.2.pdf
- 6. Datasheet MPU-6000 [Online] [Zacytowano: 2018-12-18.] https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU-6050_DataSheet_V3%204.pdf
- 7. Datasheet MS5611-01BA03 [Online] [Zacytowano: 2018-12-18.] https://www.te.com/commerce/DocumentDelivery/DDEController?Action=showdoc&DocId=Data+Sheet%7FMS5611-01BA03%7FB3%7Fpdf%7FEnglish%7FENG_DS_MS5611-01BA03_B3.pdf%7FCAT-BLPS0036
- High Power Microwaves, 3rd Edition; James Benford, John A. Swegle, Edl Schamiloglu, ISBN 9781482260595 - CAT# K24250, Published November 5, 2015