

Jarosław SULKOWSKI, Janusz BŁASZCZYK, Adam GRZYBOWSKI,  
Kacper KAR CZ, 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, kilkuwirmnikowe statki powietrzne charakteryzujące się dużą dynamiką zmian kierunku lotu oraz możliwością stabilnego zawisu w powietrzu. Prędkości, które rozwijają drony, dochodzą 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 siatkę, 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 mijając 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, sięgająca 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 Microwave 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 uderowego 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 przewodzących 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.

### **Płytką sterująca Naze32**

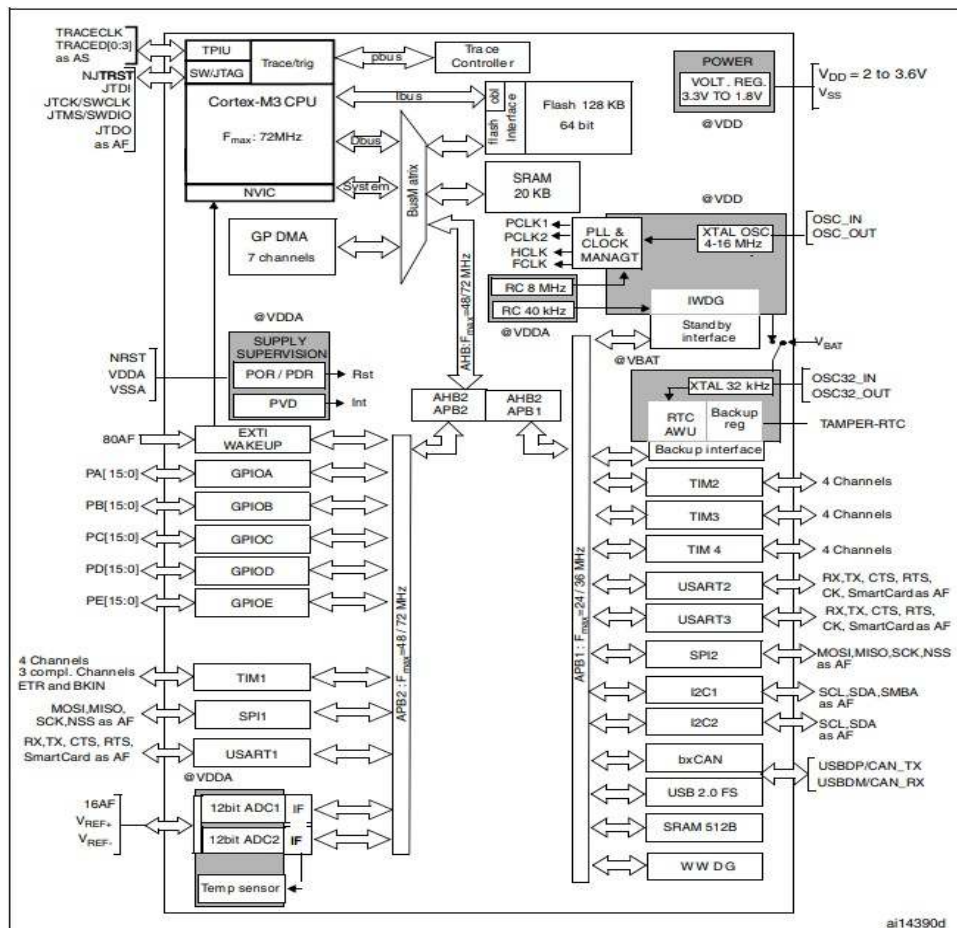
Sercem systemu jest popularna płytką sterująca Naze32 rev6 6DOF (w wersji szóstej) [5]. Powoduje to, że układ elementów i ścieżek jest w tej iteracji układu zoptymalizowany pod kątem niezawodności podzespołów. Sercem płytki jest mikrokontroler STM 32 F1 w architekturze ARM Cortex M3 – RISC pracujący 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 płytką 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].

Płytką Naze32 wykorzystuje również czujnik ciśnienia do określania swojej względnej wysokości. Realizuje to układem firmy TE Connectivity 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 niekranowanych układach.



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

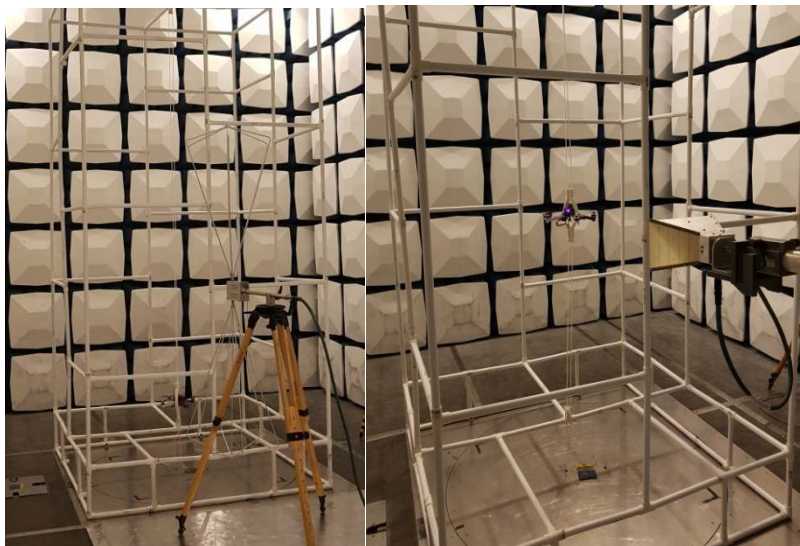
Stosowanie modulacji sygnału narażenia powoduje zwiększenie prawdopodobieństwa wystąpienia wzbudzenia rezonansowego w układzie. Częstotliwości rezonansowe prawdopodobnie odpowiadać będą pojemnościom kondensatorów wykorzystywanych jako filtry dolnoprzepustowe części logicznych i pasozytniczych indukcyjności. Rezonans napięciowy jest predysponowany do wystąpienia w przypadkowych miejscach układów elektronicznych poddanych narażeniu promieniowaniem mikrofalowym jako że taki rezonans występuje w obwodach szeregowych.

Rezonans ten spowodowany byłby najprawdopodobniej pojemnością lub wypadkową pojemnością w danym punkcie kondensatorów filtrujących i pasozytniczej 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 wewnątrz klatki, a następnie ustawiany w miejscu, w którym pozycjonowano sondę wykorzystywaną podczas kalibracji układu narażania, w odległości jednego metra od anteny emitującej promieniowanie. Ustawienie takie umożliwiły liny w prowadnicach po obu stronach drona. Dzięki 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 prędkości obrotów silników (ciągu w osi wertykalnej) pozbawiony został układu sprzężającego, 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 upływie 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 osiągnięta 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 przechylenie 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.

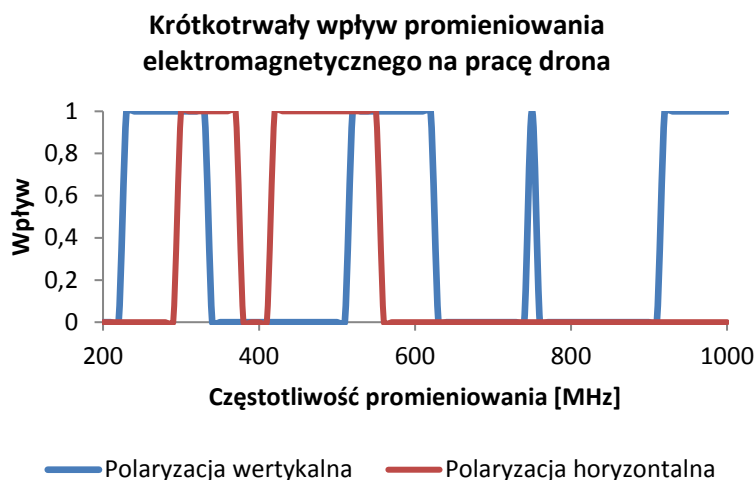


Rys. 4. Długotrwały wpływ oddziaływania promieniowania na drona – stałe wychylenie drona



Nagle 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.

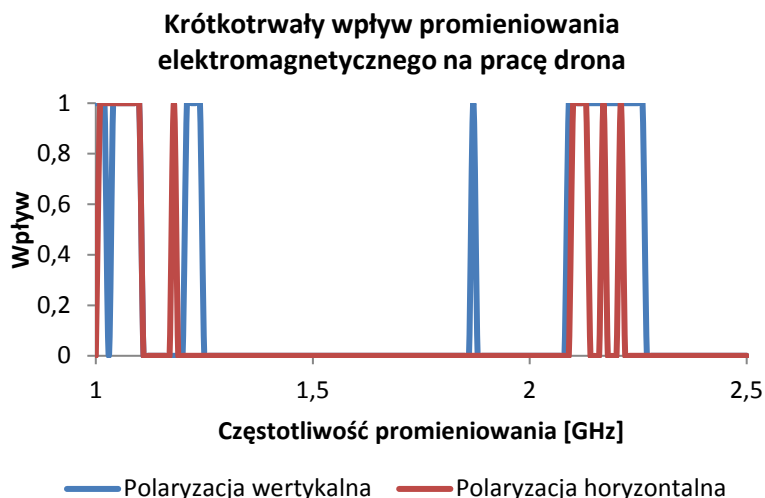
Opisane zostaną tylko pomiary dla mocy 50 V/m – dla mniejszych mocy zawężał się zakres częstotliwości, dla których obserwowano oddziaływanie promieniowania na drona. Wpływ ten cechował się zmniejszoną intensywnością reakcji. Należy zaznaczyć, że w zasadniczej większości przypadków wpływ był obserwowany 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.



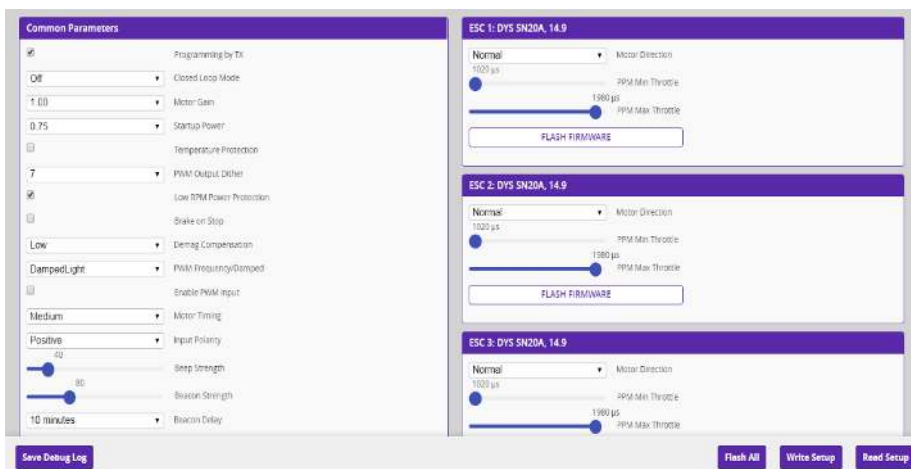
**Rys. 6.** Krótkotrwały wpływ promieniowania na pracę drona w zależności od częstotliwości promieniowania o natężeniu 50 V/m

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.

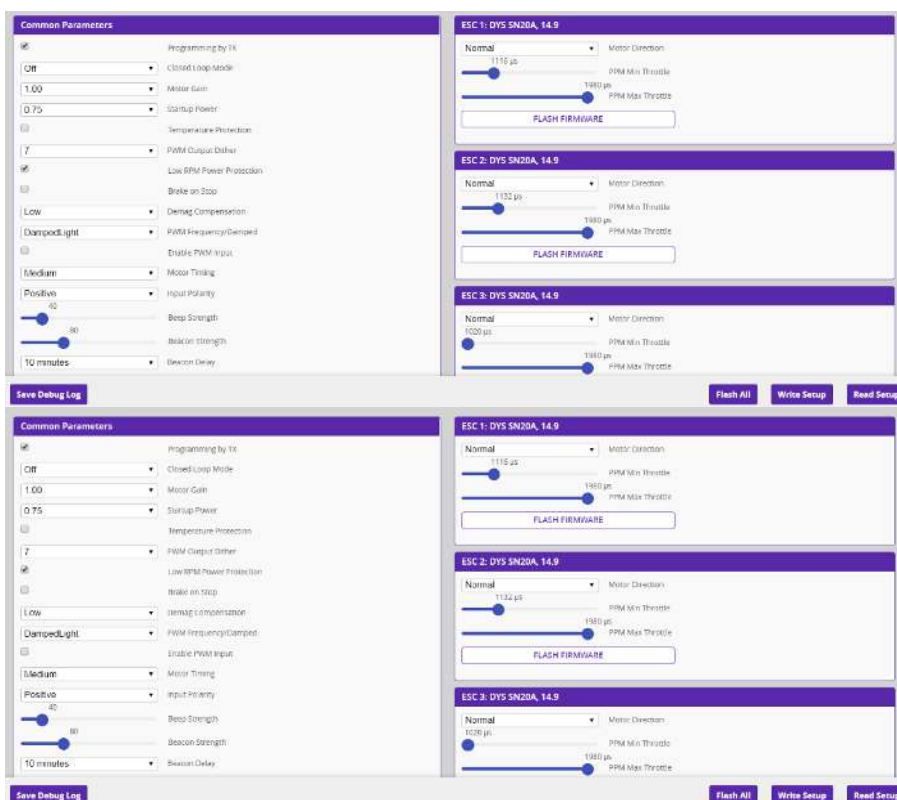
Podczas prób osiągnięto niekontrolowany ruch drona w górę klatki oraz szarpanie na boki. Efekt ten był mniej lub bardziej dynamiczny. Niekiedy wydawało się, że silniki zaczynały pracować na najwyższych dostępnych obrotach. Podejrzewa się, że za wystąpienie tego efektu odpowiada zakłócenie czujnika przyśpieszenia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

Osiągnano również powolne lub natychmiastowe opadanie drona. W tym wypadku podejrzewa się zakłócenie pracy barometru (MS5611-01BA03) na płycie 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) zapisane 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 wroga drona.



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



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 jakiegokolwiek trwałego fizycznego uszkodzenia drona (*hardkill*), które wymagałoby wymiany podzespołów.

## 6. Literatura

1. 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](https://www.gearbest.com/multi-rotor-parts/pp_606368.html).
2. Bhphotovideo. Mvic Pro [Online] [Zacytowano: 2018-12-18.] ([https://www.bhphoto-video.com/c/product/1285011-REG/dji\\_cp\\_pt\\_000500\\_mavic\\_pro.html](https://www.bhphoto-video.com/c/product/1285011-REG/dji_cp_pt_000500_mavic_pro.html))
3. STM electronics. STM32F103x8 datasheet [Online] [Zacytowano 2018-12 -18] (<https://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00161566.pdf>)
4. 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://quadquestions.com/Naze32\\_rev6\\_manual\\_v1.2.pdf](https://quadquestions.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](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](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)
8. High Power Microwaves, 3rd Edition; James Benford, John A. Swegle, Edl Schamilo-glu, ISBN 9781482260595 - CAT# K24250, Published November 5, 2015