

KOMUNIKACJA RADIOWA GRUPY DRONÓW W PAŚMIE 433 MHz W OBSZARZE LINII WYSOKIEGO NAPIĘCIA

Patryk SZYWALSKI, Andrzej WAINDOK, Bronisław TOMCZUK

Politechnika Opolska, Katedra Elektrotechniki i Mechatroniki

tel. 77 449 8027, 77 449 8029

e-mail: patryk.szywalski@gmail.com, a.waindok@po.edu.pl, b.tomczuk@po.edu.pl

Streszczenie. W ramach badań wykonano pomiary wpływu zakłóceń występujących w pobliżu dwutorowej linii WN (400kV) na pracę urządzeń latających (dronów) oraz na zakłócenia występujące podczas ich wzajemnej komunikacji w paśmie 433 MHz. Badania pozwoliły na określenie najbardziej istotnych źródeł zakłóceń.

Słowa kluczowe: bezzałogowe urządzenia latające, zakłócenia elektromagnetyczne, komunikacja radiowa, diagnostyka linii WN.

1. WSTĘP

Diagnostyka stanu pracy linii wysokiego napięcia WN jest istotna w eksploatacji sieci energetycznych. Wiele zjawisk ma wpływ na prawidłowe funkcjonowanie tych sieci. Są to: wiek, warunki atmosferyczne. Ocenę stanu linii WN można dokonać analizując jej parametry poprzez odpowiednie przyrządy zainstalowane na linii. Jednak nawet bardzo zaawansowane systemy i algorytmy nie są w stanie wychwycić pewnych uszkodzeń mechanicznych [1]. W celu wykrywania mechanicznych i elektrycznych uszkodzeń są m.in. używane drony. Dotyczy to uszkodzonych izolatorów lub też linii albo słupów energetycznych. Drony te wykonują zdjęcia, które mogą być zdalnie analizowane. Jednakże, zdjęcia te są wykonywane najczęściej tylko przez jednego drona, który wykonuje lot równoległy wzdłuż linii.

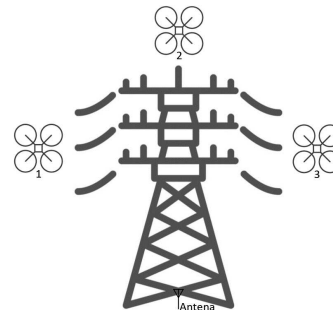
Postęp technologiczny XXI wieku spowodował automatyzację wielu procesów. Jednym z nich może być nadzór linii wysokiego napięcia (WN) za pomocą kilku bezzałogowych urządzeń latających (unmanned aerial vehicle - UAV). Zaletą stosowania takich urządzeń jest bez wątpienia możliwość wykonywania szybkiej, powtarzalnej i stosunkowo taniej oceny linii. Wadą takich urządzeń jest jednak stosunkowo ograniczony czas lotu, który nawet w dobrych konstrukcjach wynosi maksymalnie 40 minut. Jednakże, już obecnie istnieje możliwość ładowania urządzeń bezprzewodowo, co w przyszłości może umożliwić wydłużenie czasu lotu drona [2].

2. OPIS EKSPERYMENTU

Ważnym elementem urządzenia latającego jest jego układ nawigacji oraz komunikacji. Układ nawigacji bazuje na szeregu czujników, które mogą podlegać

zakłóceniom elektromagnetycznym. Podobnie, układ komunikacji bazujący na antenach podlega zakłóceniom radiowym. W związku z tym bardzo ważne jest eliminowanie lub ograniczanie wymienionych zakłóceń.

W badaniach, które zostały wykonane w ramach niniejszej pracy, wykorzystano drona zaprojektowanego i wykonanego przez jednego z autorów. Na rysunku 1 przedstawiono trzy koncepcje lotu drona w pobliżu linii WN (400 kV). W trakcie badań wykonano lot jednego drona z lewej strony linii i nad nią. Komunikacja drona odbywała się ze stacją naziemną. Rejestrowano wskazania czujników umieszczonych na dronie (GPS, magnetometr) oraz poziom mocy sygnału.



Rys. 1. Ułożenie drona wokół linii

3. OPIS DRONA (QUADCOPTERA)

Opracowany quadcopter wykorzystuje do lotów cztery silniki, które w połączeniu ze śmigłami tworzą jednostkę napędową. Wykonany UAV jest klasy 300 (przekątna w milimetrach pomiędzy przeciwległymi silnikami) i zasilany baterią o pojemności 4000 mAh, co umożliwia 30 minutowy lot w trybie stabilizacji po GPS. Urządzenie wyposażono w dwa moduły radiowe, jeden do komunikacji pomiędzy dronami (433 MHz) oraz drugi do zabezpieczenia układu i nadzoru lotu (2,4 GHz). Quadcopter w trakcie badań był sterowany autonomicznie. W każdej chwili operator mógł jednak przejąć nad nim kontrolę (stąd wykorzystanie drugiego modułu radiowego). Zaletą autonomicznego lotu jest możliwość zaprogramowania dokładnej trajektorii lotu, a co za tym idzie, możliwość umieszczenia drona dokładnie na tej samej wysokości podczas każdego pomiaru [3].

W urządzeniu zamontowano moduł radiowy RFM69 433 MHz w wersji LoRa (Long Range) wykonany przez firmę Adafruit. Cechuje się on zyskiem wzmocnienia od +13 dBm do +20 dBm, mocą 100 mW oraz zasięgiem od 350 m do 5 km (w zależności od anteny i wielkości pakietu danych, przeszkód, mocy, itp.).

Wykorzystany moduł radiowy działa na zasadzie modulacji częstotliwościowej GFSK. W projekcie założono przesyłanie 56 bajtów z częstotliwością 10 Hz. Oznacza to przyjęcie szybkość transmisji danych 9,6 kb/s oraz szerokość pasma 19,2 kHz.

4. OPIS WSPÓLCZYNNIKÓW JAKOŚCI KOMUNIKACJI WYKORZYSTANYCH W BADANIACH

W pracy przyjęto dwa współczynniki określające jakość połączenia. Jednym z nich jest współczynnik RSSI (z ang. Received Signal Strength Indicator) [4], natomiast drugim współczynnik straconych bajtów.

RSSI jest wskaźnikiem mocy odbieranego sygnału radiowego. Wartość mocy sygnału jest mierzona w decybelach w odniesieniu do mocy 1 mW w zakresie od 0 do -120 dBm. Im bliżej zera, tym silniejszy jest sygnał. W tabeli 1 dokonano klasyfikacji jakości sygnału względem wartości mierzonego RSSI [5].

Tabela 1. Klasyfikacja jakości sygnału w funkcji jego mocy

Siła sygnału (dBm)	Klasyfikacja
-30 ÷ 0	Bez błędne
-67 ÷ -30	Bardzo dobre
-70 ÷ -67	Dobry
-80 ÷ -70	Na granicy użyteczności
-90 ÷ -80	Nieużyteczne

Drugim analizowanym parametrem jest współczynnik utraconych bajtów w komunikacji pomiędzy urządzeniami. Został on wyznaczony na podstawie wzoru 1.

$$err = \frac{\sum_{i=1}^{nd} (\sum_{j=1}^n (dm_j \cdot dp_j)) + (t_{err} \cdot dp_size)}{nd \cdot dp_size \cdot 0.01} \quad (1)$$

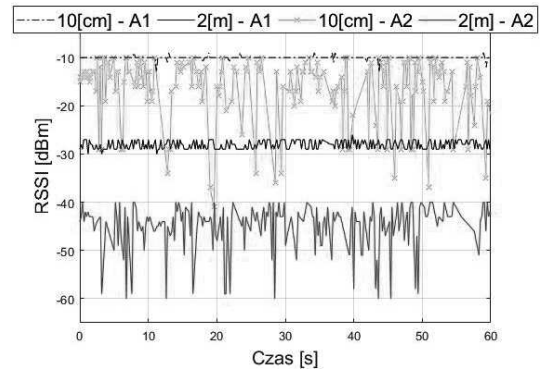
gdzie: nd – liczba żądanych pakietów, n – liczba wysłanych parametrów (obecnie $n=15$), dm – komunikat wiadomości (1 - błąd, 0 – poprawny parametr), dp_j wielkość w bajtach j -ego parametru, dp_size – wielkość wysyłanej paczki (w analizowanym przypadku 56 bajtów), t_{err} - licznik brakujących pakietów danych.

W ramach jednego pakietu danych wysyłano 56 bajtów zawierających informację z GPS'u oraz samego urządzenia, jak na przykład punkt celu danego urządzenia. Na otrzymanych danych możliwe było wychwycenie zniekształcenia informacji, co zwiększało współczynnik błędów.

5. WYBÓR ANTENY DO BADAŃ

W początkowym etapie pracy zbadano dwie konstrukcje anten radiowych. Pierwsza z nich była anteną śrubową (helikalną) o średnicy zwoju 4 mm i długości 50 mm. Ten typ anteny jest bardzo często spotykany w modułach 433 MHz. Jego największą zaletą są małe wymiary geometryczne. Kolejną anteną był dipol ćwierćfalowy wykonany z drutu miedzianego o średnicy

1 mm i długości 16,5 cm. Jego zaletą jest dużo większa elastyczność i wytrzymałość mechaniczna. Ze względu na zastosowanie nie powinno się stosować anten kierunkowych, gdyż praktycznie niemożliwe jest sterowanie urządzeniami w taki sposób, aby obie tego typu anteny były skierowane do siebie.

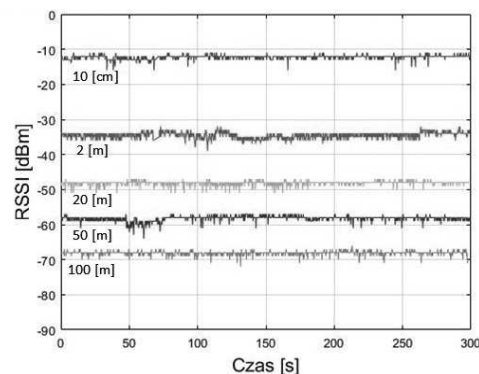


Rys. 2. Pomiar RSSI w komorze odbiciowej – dipol ćwierćfalowy(A1), antena helikalna (A2)

Na rysunku 2 zamieszczono wynik pomiaru parametru RSSI w stanie statycznym, w komorze bezodbiciowej. Dla anteny helikalnej (A2) widoczne są duże szумы w transmisji danych. W przypadku dipola ćwierćfalowego wartości szumów okazały się mniejsze. Z tego względu zdecydowano się na wykorzystanie tej anteny do dalszych badań.

6. USTALENIE WARTOŚCI REFERENCYJNYCH MOCY SYGNAŁU

Dla poprawnego wyznaczenia wpływu linii wysokiego napięcia na transmisję danych przeprowadzono dodatkowe badania w wolnym obszarze bez przeszkód.



Rys. 3. Pomiar RSSI na wolnej przestrzeni

Tabela 2. Zestawienie danych pomiarowych

Warunki pomiaru	Odległość [m]	Średnia RSSI [dBm]	Odczylenie standardowe pomiaru RSSI	Średni błąd transmisji [%]
Komora bezodbiciowa	0,1	-9,99	0,36	0,53
	2	-27,63	0,98	0,53
Teren niezabudowany	0,1	-12,22	0,59	0,19
	2	-34,54	0,89	0,73
	20	-48,16	0,59	0,39
	50	-58,24	0,74	0,14
	100	-68,11	0,58	0,34

Zmierzono parametry transmisji w funkcji odległości między dronem i stacją bazową: dla 10 cm, 2 m, 20 m, 50 m, 100 m. Wykonano także pomiary w komorze bezodbiłkowej oddalając odbiornik od nadajnika na odległość 10 cm oraz 2 m. Wyniki zamieszczono na rys. 3 oraz w tabeli 2. Parametr RSSI maleje znacząco wraz ze wzrostem odległości pomiędzy nadajnikiem, a odbiornikiem. Zauważono jednak, że odległość nie wpływa znacząco na wartość parametru błędu transmisji danych *err* - jest on niemal niezmienny w całym zakresie badanej odległości (tabela 2).

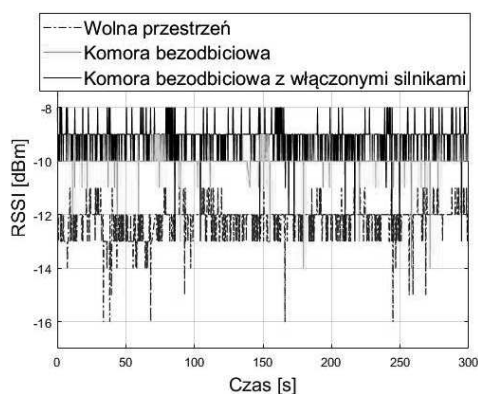
7. WPŁYW PRACY SILNIKÓW NA MAGNETOMETR I TRANSMISJĘ DANYCH

Analiza wpływu linii WN na transmisję danych wymaga znajomości składowych błędów transmisji w warunkach normalnych. Na rysunku 4 oraz w tabeli 3 pokazano otrzymane przebiegi zarejestrowane podczas pracy silników drona w komorze bezodbiłkowej. Analiza wykazała, że praca silników i innych podzespołów (jak np. odbiornik radiowy 2,4GHz, moduły sterowania czy sama konstrukcja ramy) nie wpływa istotnie na moc odbieranego sygnału. Należy zaznaczyć, że badanie wykonano umieszczając antenę nadajnika i odbiornika równolegle do siebie w odległości 10 cm.

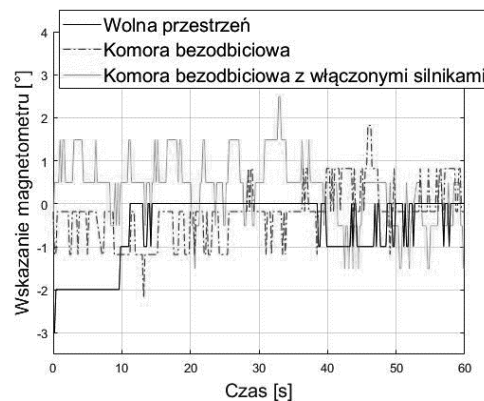
Tabela 3. Zestawienie danych pomiarowych dla odległości między nadajnikiem i odbiornikiem równej 10 cm w komorze bezodbiłkowej produkcji Astat

Warunki pomiaru	Praca silników	Średnia RSSI [dBm]	Odczylenie standardowe pomiaru RSSI	Średni błąd transmisji [%]
Komora bezodbiłkowa	Nie	-9,99	0,36	0,53
	Tak	-9,16	0,58	0,19

Ważnym elementem pracy quadcoptera w lotach ze wspomaganie GPS, bądź autonomicznym jest magnetometr. Na rysunku 5 pokazano wpływ pracy elementów składowych urządzenia na wskazania magnetometru. Jako wskaźnik oceny przyjęto odchylenie standardowe [6]. Dla pomiaru niezakłócanego czujnika w stanie statycznym i warunkach normalnych (otwarta przestrzeń) otrzymano wartość odchylenia 0,623, w komorze bezodbiłkowej 0,694, natomiast w komorze bezodbiłkowej z uruchomionymi silnikami wartość odchylenia wzrosła do 1,28.



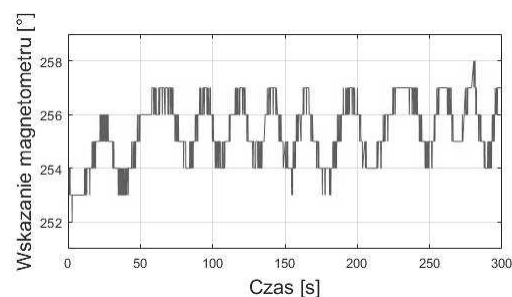
Rys. 4. Wpływ pracy elementów urządzenia na wartość RSSI



Rys. 5. Wpływ pracy elementów urządzenia na wskazanie magnetometru

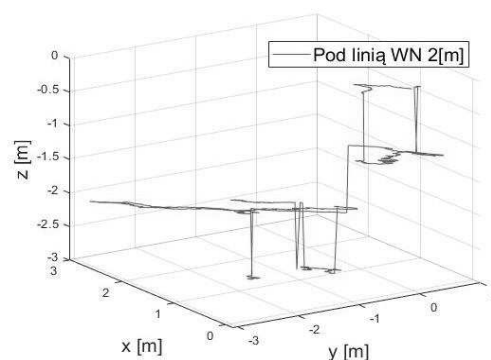
8. WPŁYW LINII WN NA GPS I MAGNETOMETR

Analiza wpływu linii WN na pracę drona wymaga także przeprowadzenia badań wpływu zakłóceń linii na wskazania magnetometru i GPS'u. Na rysunku 6 zamieszczono charakterystykę statyczną zbadanego magnetometru. Odchylenie standardowe wykresu wynosi 1,18 i jest nieznacznie większe od wskazania w komorze bezodbiłkowej. Widoczne są także regularne, wolne (okres około 20 s) oscylacje wskazań.



Rys. 6. Porównanie wskazania magnetometru bezpośrednio pod linią

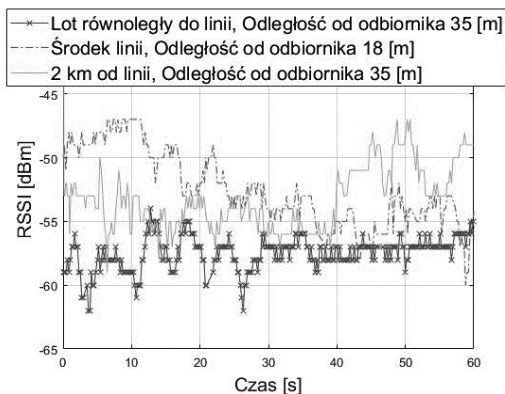
Ważnym elementem quadcoptera w momencie wykonywania lotów autonomicznych jest odbiornik sygnału GPS. Na rysunku 7 pokazano charakterystykę statyczną wykonaną bezpośrednio pod linią WN. W trakcie pomiarów odbiornik łączył się z 16 satelitami. Pomimo unieruchomienia urządzenia wskazania współrzędnych zmieniały się w granicach błędów samego odbiornika sygnału GPS's (około 5 m), na co użytkownik nie ma wpływu [7].



Rys. 7. Wskazanie GPS'u bezpośrednio pod linią (stałą pozycją drona)

9. WPŁYW LINII WN NA TRANSMISJĘ DANYCH

W ramach wykonanych badań uwzględniono dwa przypadki lotu. Wyniki pomiarów zamieszczono na rysunku 8. Odbiornik sygnału znajdował się w środkowej części linii (1 metr od ziemi, rys. 1). W pierwszym przypadku umieszczono drona w torze bocznym linii na wysokości 35 m i w odległości 5 m od linii. W tym przypadku nie zauważono większych problemów z łącznością – współczynnik RSSI wahał się w granicach -62 dBm do -52 dBm.



Rys. 8. Porównanie wartości RSSI dla różnych położeń drona wokół linii

W drugim przypadku umieszczono drona pomiędzy torami linii. Poziomy sygnał łączności był niewystarczający powyżej środkowej fazy linii (wysokość około 18 m). Umieszczenie drona nad linią nie było możliwe ze względu na zerwanie połączenia. W celach porównawczych wykonano pomiary RSSI w odległości około 2 km od linii oddalając nadajnik od odbiornika o 35 metrów. Zakres zmian RSSI wyniósł od -58 dBm do -47 dBm.

10. UWAGI I WNIOSKI

Badania wykazały, że pomimo zakłóceń spowodowanych polem elektrycznym i magnetycznym linii WN, lot dronów (urządzeń) i komunikacja między nimi jest możliwa. Połączenie dwóch urządzeń może zostać zerwane w obrębie masztów oraz w środku linii. Przy lotach w przestrzeni obok toru linii łączność jest bardziej niezawodna niż w torze linii.

Ponieważ magnetometr drona służy do orientacji kierunku lotu w stosunku do orientacji geograficznej, więc jego wskazania są bardzo istotne. Problemy z tymi

wskazaniami występują w pobliżu linii, co powoduje przekłamanie wartości w stosunku do rzeczywistości. Dla częstotliwości technicznej (50 Hz) pole magnetyczne w pobliżu toru linii jest polem wirującym, więc zakłócenia magnetometru są niewątpliwie spowodowane tym polem. Próbując takie pole z częstotliwością bliską wielokrotności 50 Hz, otrzymuje się niemal sinusoidalny przebieg wskazań magnetometru. W prezentowanym przypadku okres oscylacji wynosił ok. 20 s.

Z uwagi na konieczność nieekranowania magnetometru, wydaje się celowe ustalenie apriorycznego toru poruszania się drona, co będzie uwzględnione w przyszłych badaniach. Dalsze prace będą również dotyczyć udoskonalenia algorytmów predykcji trajektorii lotu, co umożliwi realizację lotu, nawet po zerwaniu połączenia ze stacją bazową.

11. BIBLIOGRAFIA

1. Fei Ch., Qi G., Li Ch.: Fault location on high voltage transmission line by applying support vector regression with fault signal amplitudes, *Electric Power Systems Research*, Volume 160, July 2018, Pages 173-179.
2. Simi M., Bil C., Vojisavljevic V.: Investigation in Wireless Power Transmission for UAV Charging, *Procedia Computer Science*, Vol. 60, 2015, pp. 1846-1855.
3. Pecho P., Ažaltovič V., Kandra B., Bugaj M.: Introduction study of design and layout of UAVs 3D printed wings in relation to optimal lightweight and load distribution, *Transportation Research Procedia*, Volume 40, 2019, Pages 861-868.
4. Zhou Y. D., Wei M. X., Hao Z.: Research on ZigBee Indoor Technology Positioning Based on RSSI, *Procedia Computer Science*, Vol. 154, 2019, pp. 424-429.
5. Booranawong A., Sengchuai K., Jindapetch N.: Implementation and test of an RSSI-based indoor target localization system: human movement effects on the accuracy, *Measurement*, Volume 133, February 2019, pp. 370-382.
6. Kapoor R., Gupta R., Son Le H., Jha S., Kumar R.: Boosting performance of power quality event identification with KL Divergence measure and standard deviation, *Measurement*, Volume 126, October 2018, Pages 134-142.
7. Szywalski P., Wajnert D.: Possibility Analysis of the Location Measurement by Using the GPS Receiver and Barometric Altimeter, *Pomiary-Automatyka-Robotyka*, R. 22, Nr. 3, 2018, ss 33 – 39.

RADIO COMMUNICATION OF A DRONE GROUP FOR 433 MHZ BAND IN THE AREA OF HV LINES

The impact of disturbances arising in the area of a two-ways HV grid (400 kV) on the aerial vehicles (drones) work was measured. The influence of these disturbances on the communication quality between devices for a 433 MHz band was investigated, as well. The research allowed to determine the main sources of disruptions.

Keywords: Unmanned Aerial Vehicles (UAV), electromagnetic disruption, radio communication, HV line diagnostics.