

## Praca grupy dronów w pobliżu linii najwyższego napięcia

**Streszczenie.** Zbadano zachowanie się bezzałogowych urządzeń latających w pobliżu dwutorowej linii najwyższego napięcia (400kV). Szczególny nacisk położono na wpływ generowanych przez linię zakłóceń elektromagnetycznych na pracę urządzeń pokładowych (czujniki, układy sterowania) oraz na jakość transmisji danych. Wykonane eksperymenty pokazały, że lot grupy dronów wzdłuż linii najwyższego napięcia jest możliwy, lecz należy uwzględnić pewne zakłócenia, które mogą zaburzać ich wzajemną komunikację.

**Abstract.** The operation of Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) in the vicinity of the double extra high voltage (EHV) line (400kV) was investigated. We focused on the impact of the electromagnetic interference generated by the line on the operation of on-board devices (sensors, control systems) and on the quality of the data transmission. The performed experiments showed that the fly of the drones' group along the HV line is possible, but some noise of signals, which can disturb intercommunication, should be taken into account. **Implementation of a drones group in the area of extra high voltage grids**

**Słowa kluczowe:** Zakłócenia elektromagnetyczne, komunikacja radiowa, diagnostyka linii najwyższych napięć, bezzałogowe jednostki latające.

**Keywords:** Electromagnetic interference, radio communication, HV grid diagnostics, Unmanned Aerial Vehicles (UAV).

### Wstęp

Obecnie coraz więcej miejsca w literaturze zajmuje tematyka adaptacji dronów do zastosowań w przemyśle i różnych dziedzinach życia. Urządzenia te, zwane bezzałogowymi systemami latającymi (ang. Unmanned Aerial Systems UAS) są wykorzystywane do nadzoru pól uprawnych, transportu paczek czy w branży filmowej [1-3]. Jednym z zastosowań jest monitorowanie pracy linii najwyższego napięcia. W skład systemu monitorującego wchodzi nie tylko drony lecz również systemy komunikacji oraz system kontroli i nadzoru. Zaletą stosowania takich urządzeń jest możliwość wykonywania szybkiego, powtarzalnego i taniego pomiaru stanu linii.

Obecnie najczęściej stan linii najwyższych napięć jest określany z wykorzystaniem zainstalowanych na niej przyrządów pomiarowych. Jednak nawet bardzo zaawansowane systemy i algorytmy nie są w stanie wykryć pewnych uszkodzeń mechanicznych [4-6]. Do oceny stanu linii najwyższych napięć „z powietrza” stosuje się często helikoptery bądź samoloty osobowe - koszt jednego przelotu oscyluje w granicach kilku tys. złotych. Wykorzystanie bezzałogowego systemu latającego (UAS) składającego się z kilku, zsynchronizowanych, urządzeń latających pozwoliłoby na obniżenie w/w kosztów oraz zwiększyłoby możliwości pod względem diagnostyki. Trzy urządzenia lecące równoległe do linii najwyższego napięcia, w przeciwieństwie do pojedynczego UAV, pozwoliłyby na wygenerowanie trójwymiarowego obrazu linii. Dodatkową zaletą byłaby możliwość wykonania zdjęć uszkodzeń z różnych perspektyw, nawet w odległości kilku metrów od linii czy też masztu bądź izolatora.

Pewnym problemem współpracy grupy dronów jest, podobnie jak innych mobilnych urządzeń autonomicznych, zasięg, który wiąże się ze stosunkowo krótkim czasem lotu. Nawet w przypadku bardzo drogich urządzeń, których czas lotu wynosi około 40 minut, rozładowanie baterii w trakcie pracy prowadzi do utraty bądź uszkodzenia urządzenia [7]. Problem ten może jednak zostać rozwiązany przez stacje ładowania bezprzewodowego [8] bądź rozwiązania hybrydowe wykorzystujące zamiast ciężkich akumulatorów litowo-polimerowych wodór i ogniwa paliwowe [9]. Takie rozwiązanie zwiększa czas lotu nawet do 4 godzin.

Badania przedstawione w artykule zostały wykonane przy wykorzystaniu quadcoptera klasy 300 (odległość w milimetrach pomiędzy silnikami umieszczonymi na przekątnej zespołu napędowego) o stosunkowo małej wadze – 589 gramów (rys. 1). Powodem wykorzystywania urządzenia czterosiłnikowego o pionowym starcie są jego

możliwości ruchowe - urządzenie potrafi poruszać się w każdą stronę, obracać się, a także zawisnąć w miejscu. Dodatkowo, urządzenia wyposażone w odbiornik sygnału GPS mogą wykonywać lot autonomiczny, co daje duże możliwości wykonywania pomiarów.



Rys.1. Zdjęcie wykonanego urządzenia

Wykonanie lotów w grupach wymaga bezprzewodowego połączenia ich w jeden system. W niniejszej pracy zbadano przeznaczoną do tego celu komunikację radiową opartą na modułach radiowych RFM69 433 MHz w wersji LoRa (Long Range). Także pewne komponenty UAS, w szczególności magnetometrii i czujniki GPS, są podatne na zakłócenia pola elektromagnetycznego. Utrudnia to ich używanie w pobliżu źródeł tego pola, jakimi bez wątpienia są linie najwyższych napięć. W związku z tym przeprowadzono badania wpływu obecności linii 400 kV na pracę wymienionych czujników oraz komunikację między dronami. Przeprowadzone badania pozwoliły na określenie najbardziej istotnych źródeł zakłóceń, co stwarza możliwość eliminacji ich wpływu na przyszłych konstrukcjach dronów.

### Zabezpieczenie elektroniki UAV przed polem elektromagnetycznym linii 400 kV

Zakłócenia elektromagnetyczne są częstym zjawiskiem występującym w zdalnie sterowanych autonomicznych urządzeniach mobilnych, zwłaszcza w paśmie częstotliwości radiowych emitowanych przez silniki i układ zasilania. Dlatego też użytkowanie bezzałogowego systemu latającego UAV w obszarze linii najwyższego napięcia także wiąże się z koniecznością uwzględnienia zakłóceń. W celu ograniczenia tych zakłóceń stosuje się odpowiednie osłony (ekrany) [10]. Wykorzystując zależność określającą głębokość wnikania fali elektromagnetycznej:

$$(1) \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \sigma}}$$

gdzie:  $\sigma$  - przewodność przewodu,  $f$  - częstotliwość,  $\mu_r$  - przenikalność magnetyczna materiału,  $\mu_0$  - przenikalność magnetyczna próżni

wyznaczono minimalną grubość ekranu dla wybranych materiałów (tabele 1 i 2). Obliczono głębokość wnikania fali w funkcji częstotliwości, przyjmując górną jej wartość równą częstotliwości 13-tej harmonicznej (650 Hz) częstotliwości technicznej w kraju. Przyjęto, iż większy wpływ na pracę urządzenia mają wyższe harmoniczne, ze względu na mniejszą długość fali.

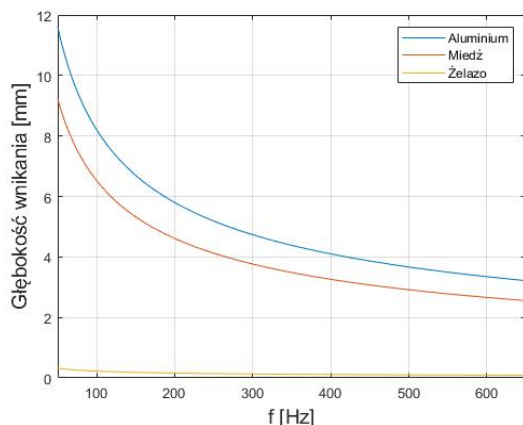
Tabela 1. Parametry analizowanych materiałów

Materiał	Rezystywność [Ω·m]	Przenikalność magnetyczna [ $\frac{V \cdot s}{A \cdot m}$ ]	Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]
Aluminium	$2,6548 \times 10^{-8}$	1,00002	2,7
Miedź	$1,678 \times 10^{-8}$	0,999991	8,94
Żelazo	$10 \times 10^{-8}$	5000	7,85

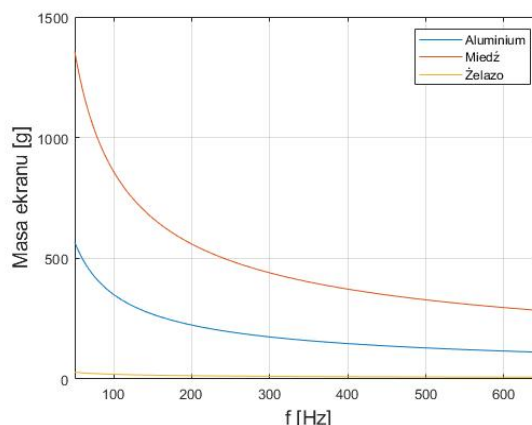
Na rysunku 2 przedstawiono graficznie głębokość wnikania pola w wybranych materiałach, natomiast na rysunku 3 pokazano zależność masy ekranu od częstotliwości fali elektromagnetycznej. Ponieważ ważnym parametrem UAV jest jego masa całkowita, to najbardziej optymalnym materiałem na ekran jest blacha stalowa. Zakładając minimalną częstotliwość zakłóceń  $f=250$  Hz, otrzymuje się ekran o masie 15 g. Taka dodatkowa masa jest akceptowalna i nie powinna znacząco wpłynąć na czas lotu urządzenia.

Tabela 2. Głębokość wnikania pola magnetycznego dla wybranych materiałów [mm]

Materiał	Aluminium	Miedź	Żelazo
50 Hz	11,6	9,22	0,31
5-ta harmoniczna 250 Hz	5,18	4,12	0,14
7-ta harmoniczna 350 Hz	4,38	3,49	0,12
9-ta harmoniczna 450 Hz	3,87	3,07	0,1
11-ta harmoniczna 550 Hz	3,5	2,78	0,09
13-ta harmoniczna 650 Hz	3,22	2,56	0,088



Rys.2. Głębokość wnikania fali elektromagnetycznej dla wybranych materiałów



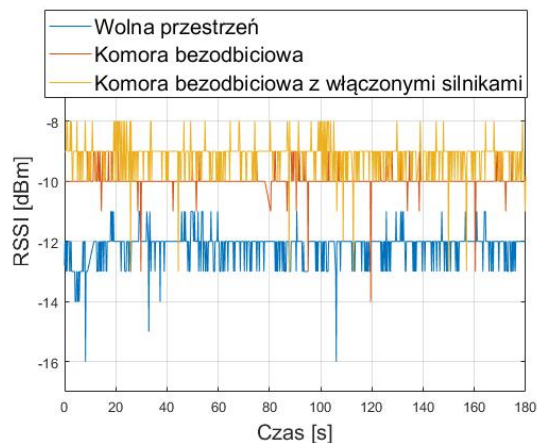
Rys.3. Zależność masy ekranu od częstotliwości potrzebnej do zaekranowania układów elektroniki o wymiarach 5x5x3 [cm]

### Wpływ zakłóceń pokładowych na pracę magnetometru i transmisję danych

Analiza wpływu linii 400 kV na transmisję danych wymaga znajomości składowych błędów tej transmisji w warunkach normalnych, czyli poza linią. W tym celu wykonano pomiary w komorze bezodbiowej, których wyniki przedstawiono na rysunku 4 oraz w tabeli 3. Jako wskaźnik określający jakość połączenia wybrano współczynnik RSSI (z ang. Received Signal Strength Indicator) [11]. Określa on poziom mocy odbieranego sygnału radiowego. Wartość różnicy mocy sygnału jest odnoszona do 1 mW i jest mierzona w decybelach w zakresie od 0 do -120 dBm. Im bliżej zerowej, tym sygnał jest silniejszy. Pomimo umieszczenia anteny nadajnika i odbiornika równolegle do siebie, w odległości 10 cm, nie zaobserwowano znaczącego wpływu pracy silników i innych podzespołów drona (jak np. odbiornik radiowy 2,4 GHz, moduły sterowania) na moc odbieranego sygnału.

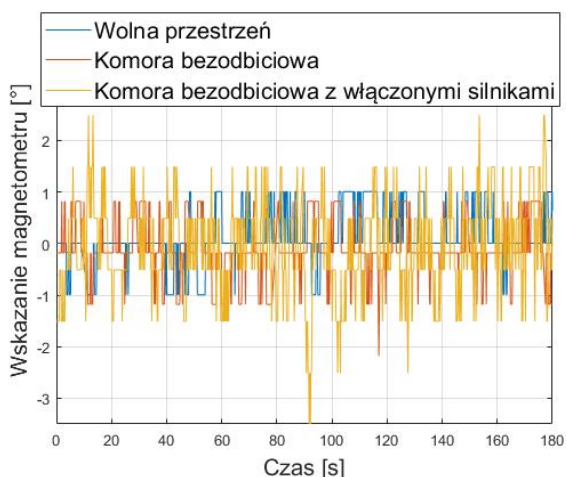
Tabela 3. Wyniki pomiarów w komorze bezodbiowej produkcji Astat

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



Rys.4. Wpływ pracy elementów urządzenia na wartość RSSI

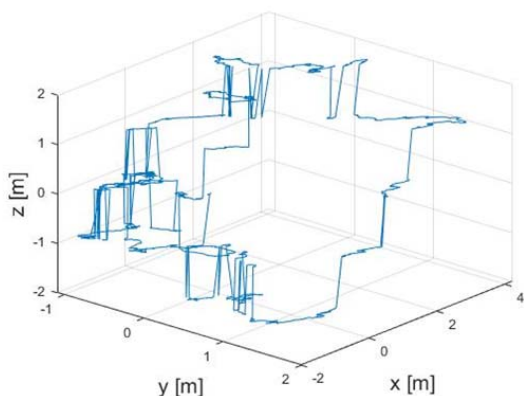
Ze względu na istotną rolę magnetometru w lotach autonomicznych, w tym ze wspomaganie GPS, przeprowadzono badania wpływu pracy elementów składowych urządzenia na wskazania magnetometru (rys. 5). Jako wskaźnik oceny przyjęto odchylenie standardowe [12]. Dla przypadku niezakłócanego czujnika, w stanie statycznym i warunkach normalnych (otwarta przestrzeń) otrzymano wartość w/w odchylenia równą 0,623. Pomiary w komorze bezodbiowej przy wyłączonych silnikach drona, dały wartość 0,694, natomiast z uruchomionymi silnikami -1,28. Są to niewielkie wartości świadczące o niewielkim wpływie silników drona na pracę magnetometru.



Rys.5. Wpływ pracy elementów urządzenia na wskazanie magnetometru

#### Wpływ linii 400 kV na GPS

Znajomość położenia UAV jest oczywiście niezbędna w celu prawidłowej realizacji lotu. W pracy zbadano wpływ linii 400 kV na wykorzystywany odbiornik sygnału GPS Ublox NEO-M8N. Jest to jeden, obok modułów radiowych, z elementów, których nie można zaekranować. Zasada działania odbiornika sygnału GPS (ang. Global Positioning System) polega na pomiarze czasu dotarcia sygnału radiowego z satelitów do odbiornika. Znając prędkość fali elektromagnetycznej oraz dokładny czas wysłania danego sygnału można obliczyć odległość odbiornika od satelitów.



Rys.6. Wskazanie GPS-u bezpośrednio pod linią 400 kV (dron nieruchomy)

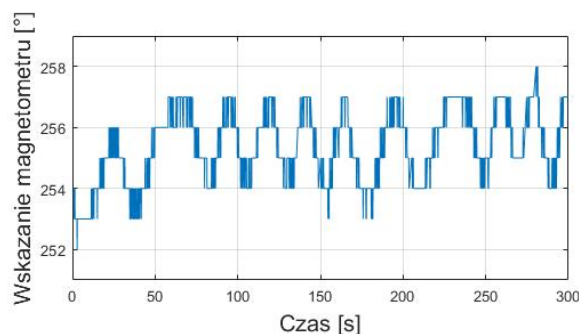
Badania zakłóceń odbiornika sygnału GPS rozpoczęto od wykonania charakterystyk statycznych z dala od linii najwyższego napięcia. W wyniku tych badań ustalono, że uchyb położenia nie przekracza 3 metrów. Następnie wykonano pomiary charakterystyki statycznej bezpośrednio

pod linią 400 kV (rys. 6). W trakcie pomiarów odbiornik łączył się z 16 satelitami. Pomimo unieruchomienia drona, wskazania współrzędnych zmieniały się w granicach błędu samego odbiornika GPS (około 5 m), na co użytkownik nie ma wpływu [13]. Oznacza to, że linie najwyższych napięć w niewielkim stopniu wpływają na wskazania GPS.

Istnieją także alternatywne systemy pozycjonowania. Jednym z nich jest nawigacja inercyjna, wyznaczająca przemieszczenie na podstawie wskazań żyroskopu, akcelerometru i (opcjonalnie) magnetometru. Spotyka się także systemy, które do oszacowania odległości wykorzystują moduły radiowe, a dokładnie analizę mocy odbieranego sygnału - RSSI.

#### Wpływ linii 400 kV na magnetometr

Ze względu na ograniczoną dokładność układu GPS, do określenia kierunku lotu, w badanym dronie zastosowano dodatkowo magnetometr. W związku z tym zbadano także wpływ linii 400 kV na jego wskazania. Umieszczając dron w pobliżu linii otrzymano charakterystykę statyczną, jak na rysunku 7. Widoczne są regularne i stosunkowo wolne (okres około 20 s) oscylacje wskazań, mogące mieć istotny wpływ na lot urządzenia. Niemniej jednak, zastosowanie odpowiednich filtrów powinno pozwolić na eliminację tego rodzaju zakłóceń.



Rys.7. Wskazanie magnetometru bezpośrednio pod linią 400 kV

#### Wpływ linii 400 kV na transmisję danych

W przypadku lotu kilku urządzeń zsynchronizowanych ze sobą, ważnym aspektem jest niezawodna łączność między nimi. W tabeli 4 przedstawiono klasyfikację jakości sygnału względem wartości mierzonego RSSI [14]. Należy nadmienić, że są to wartości orientacyjne. W przypadku lotów UAV w pobliżu linii najwyższych napięć występują także zakłócenia przypadkowe, nieregularne, które mogą prowadzić do zrywania połączenia.

Tabela 4. Klasyfikacja jakości sygnału w funkcji wartości RSSI

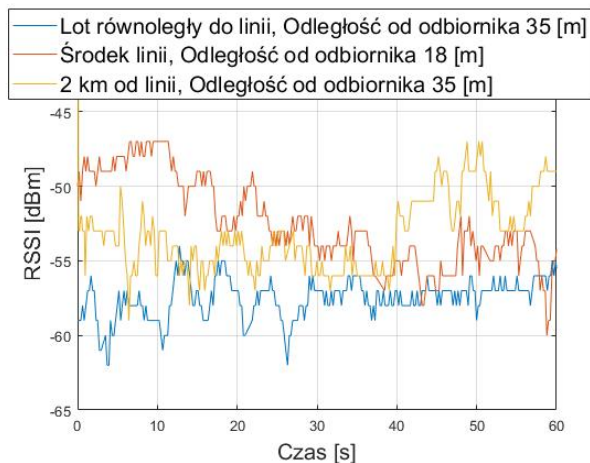
Sila sygnału (dBm)	Klasyfikacja
-30 ÷ 0	Idealny
-67 ÷ -30	Bardzo dobry
-70 ÷ -67	Dobry
-80 ÷ -70	Na granicy użyteczności
-90 ÷ -80	Nieużyteczny

W ramach wykonanych badań uwzględniono trzy przypadki lotu:

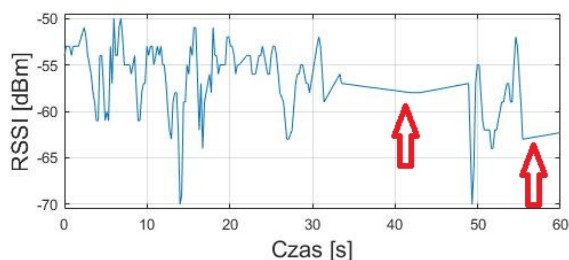
- 1) W pierwszym przypadku umieszczono dron w torze bocznym linii na wysokości 35 m i w odległości 5 m od linii 400 kV. Względna moc odbieranego sygnału była o około 5 dBm mniejsza niż w przypadku pomiarów w wolnej przestrzeni (rys. 8). Niemniej jednak mieściła się w zakresie sygnałów „bardzo dobrych”.
- 2) W drugim przypadku dron umieszczono pomiędzy torami linii. Poziom RSSI był wystarczający w zakresie odległości nie przekraczającej wysokości przewodu środkowej fazy linii (około 18 m, rys. 8). Powyżej tej wysokości występowało zrywanie połączenia.

- 3) Wykonano także pomiary sygnału w pobliżu masztu linii 400 kV. Odległość UAV do odbiornika wynosiła ok. 30 metrów. Przy tych pomiarach zauważono problemy z łącznością. Skutkowały one zrywaniem połączenia (czerwone strzałki na rys. 9).

W wyżej wymienionych pomiarach odbiornik sygnału znajdował się na wysokości 2 metrów od ziemi, w środkowej części linii (między torem 1 i 2).



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



Rys.9. Pomiar różnicy względnej mocy sygnału w pobliżu masztu (czerwone strzałki oznaczają chwile czasowe, w których następowało zrywanie połączenia)

### Uwagi i wnioski

Z przeprowadzonych badań wynikają następujące wnioski:

- Z wyłączeniem modułów radiowych i GPS, możliwe jest ekranowanie pozostałych układów elektroniki UAV, a dodatkowa waga nie wpływa znacząco na czas lotu.
- Pomimo zakłóceń spowodowanych polem elektrycznym i magnetycznym linii najwyższych napięć, lot dronów i komunikacja między nimi jest możliwa.
- Połączenie dwóch urządzeń może zostać zerwane w obrębie masztów oraz w środku linii najwyższego napięcia. W tych obszarach konieczne jest zwiększenie mocy nadajników łączności bezprzewodowej.
- Oczywiście, bardziej efektywne i miarodajne są loty diagnostyczne w bliskości linii. Jednakże, łączność jest bardziej niezawodna podczas lotów w przestrzeni obok toru linii.
- Nie zaobserwowano istotnego wpływu pola elektromagnetycznego linii 400 kV na działanie odbiornika GPS.

- W pobliżu przewodów linii najwyższego napięcia zarejestrowano duże błędy magnetometru prowadzące do przekłamania jego wskazań. Jednakże, zastosowanie odpowiednich filtrów oraz zmiana czasu próbkowania sygnału powinno wyeliminować te błędy.

**Autorzy:** mgr inż. Patryk Szywalski, Politechnika Opolska, Katedra Elektrotechniki i Mechatroniki, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, e-mail: [patryk.szywalski@gmail.com](mailto:patryk.szywalski@gmail.com); dr hab. inż. Andrzej Waindok prof. PO, Politechnika Opolska, Katedra Elektrotechniki i Mechatroniki, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, e-mail: [A.Waindok@po.edu.pl](mailto:A.Waindok@po.edu.pl); Prof. zw. dr hab. inż. Bronisław Tomczuk, Politechnika Opolska, Katedra Elektrotechniki i Mechatroniki, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: [B.Tomczuk@po.edu.pl](mailto:B.Tomczuk@po.edu.pl).

### LITERATURA

- [1] Manoj Kumara N., Sudhakar K., Samykano M., Jayaseelan V., *On the technologies empowering drones for intelligent monitoring of solar photovoltaic power plants*, International Conference on Robotics and Smart Manufacturing (RoSMa2018), Procedia Computer Science, 133 (2018), 585–593.
- [2] Pulvera A., Weib R., *Optimizing the spatial location of medical drones*, Applied Geography, 90 (2018), 9–16.
- [3] Bonali F.L., Tibaldi A., Marchese F., Fallati K., Russo E., Corselli C., Savini A., *UAV-based surveying in volcano-tectonics: An example from the Iceland rift*, Journal of Structural Geology, 121 (2019), 46-64.
- [4] 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, 160 (2018), 173-179.
- [5] Gavrilov D., Gouzman M., Luryi S., *Monitoring large-scale power distribution grids*, Solid-State Electronics, 155 (2019), 57-64.
- [6] Włodek R., *Problemy eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia – wprowadzenie*, Przegląd Elektrotechniczny, 1 (2003), 9-10.
- [7] Darielson A.S., Vandilberto P.P., Luís B.P.N., João L.O.T., João P.P.G., Jarbas J.M., Rômulo N.C.A., *Battery Discharge forecast applied in Unmanned Aerial Vehicle*, Przegląd Elektrotechniczny, 92 (2016), 185-192.
- [8] Simi M., Bil C., Vojisavljevic V., *Investigation in Wireless Power Transmission for UAV Charging*, Procedia Computer Science, 60 (2015), 1846-1855.
- [9] Gadall M., Zafar S., *Analysis of a hydrogen fuel cell-PV power system for small UAV*, International Journal of Hydrogen Energy, 41 (2016), Issue 15, 6422-6432.
- [10] Turczyn R., Krukiewicz K., Katunin A., Sroka J., Sul P., *Fabrication and application of electrically conducting composites for electromagnetic interference shielding of remotely piloted aircraft systems*, Composite Structures, 232 (2020), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263822319323670>.
- [11] Zhou Y. D., Wei M. X., Hao Z., *Research on ZigBee Indoor Technology Positioning Based on RSSI*, Procedia Computer Science, 154 (2019), 424-429.
- [12] 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, 126 (2018), 134-142.
- [13] Szywalski P., Wajnert D., *Possibility Analysis of the Location Measurement by Using the GPS Receiver and Barometric Altimeter*, Pomiary-Automatyka-Robotyka, 22 (2018), nr. 3, 33 – 39.
- [14] Booranawong A., Sengchuai K., Jindapetch N., *Implementation and test of an RSSI-based indoor target localization system: human movement effects on the accuracy*, Measurement, 133 (2019), 370-382.