

doi:10.15199/48.2023.09.37

Bezprzewodowe ładowanie akumulatorów w bezzałogowych statkach powietrznych

Streszczenie. W pracy przedstawiono przegląd literatury oraz przykłady dotychczasowych rozwiązań zastosowanych w systemach bezprzewodowego ładowania akumulatorów bezzałogowych statków powietrznych (BSP). Dokonano przeglądu elektrycznych źródeł zasilania oraz specjalizowanych układów scalonych stosowanych w ładowaniu bezprzewodowym. Omówiono koncepcję bezprzewodowego ładowania elektrycznych źródeł zasilania BSP. Zaprezentowano schemat blokowy bezprzewodowego systemu ładującego będącego praktycznym rozwinięciem koncepcji.

Abstract. This paper presents a literature review and examples of existing solutions used in wireless charging systems for unmanned aerial vehicle (UAV) batteries. Electric power sources and specialized integrated circuits used in wireless charging are reviewed. The concept of wireless charging of BSP electric power sources was discussed. A block diagram of a wireless charging system that is a practical development of the concept was presented. **Wireless charging of batteries in unmanned aerial vehicles.**

Słowa kluczowe: zasilanie bezprzewodowe, bezzałogowe statki powietrzne - BSP, bezprzewodowe urządzenia ładujące, źródła zasilania.

Keywords: wireless power supply, unmanned aerial vehicles - UAV, wireless charging devices, power sources.

Wstęp

Na przestrzeni minionych kilkunastu lat bezzałogowe statki powietrzne BSP (ang. Unmanned Aerial Vehicle, UAV) tzw. „drony” stały się bardzo popularne. Wykorzystywane są w celach amatorskich i komercyjnych, a obecny konflikt zbrojny w Ukrainie zmienił myślenie o BSP już nie tylko jako o zabawce, ale jako o pełnowymiarowej broni ofensywnej. Dla cywilnego użytkownika dostępnych jest wiele rozwiązań BSP, których użytkowanie określono europejskimi przepisami [1,2]. W konstrukcjach BSP stosuje się silniki bezszczotkowe BLDC (ang. BrushLess Direct-Current motor). Moce pobierane w trakcie lotu przez silniki BLDC mogą dochodzić do kilkuset watów. Tak duże zapotrzebowanie na energię wymaga stosowania wydajnych źródeł zasilania prądu stałego [3,4]. Czas lotu BSP produkowanych komercyjnie trwa w granicach od kilku do kilkudziesięciu minut i zależy przede wszystkim od pojemności zastosowanych akumulatorów.

Podczas przygotowania do ponownego lotu BSP kluczową rolę odgrywa wymiana akumulatora realizowana przez operatora po wylądowaniu urządzenia, co jest najszybszą metodą przygotowania do ponownego lotu. Wadą tego rozwiązania jest fakt, że BSP musi powrócić na miejsce, w którym znajduje się operator. Może to powodować ujawnienie pozycji własnej pododdziału, któremu możemy przeciwdziałać poprzez zautomatyzowanie procesu obsługi (ładowania źródeł zasilania) np. poprzez zastosowanie stanowisk startowych, oddalonych od operatora - pododdziału w pewnej odległości zależnej od zasięgu radiowych urządzeń sterujących. Na stanowisku startowym, akumulatory ładowane są bezprzewodowo lub przewodowo, energia elektryczna wykorzystywana w procesie ładowania jest pozyskiwana z ogniw fotowoltaicznych.

Źródła zasilania BSP

We współczesnych BSP akumulatory są jednym z ważniejszych elementów, od których zależy czas lotu. Z tego względu powinny charakteryzować się: dużą pojemnością, małą masą, odpornością na głębokie rozładowanie i szybkie ładowanie, dużą wytrzymałością mechaniczną oraz jak najmniejszą utratą pojemności w niskich temperaturach. W zasilaniu BSP najczęściej wykorzystywane są akumulatory litowo-polimerowe LiPO (rysunek 1), w mniejszym stopniu akumulatory litowo-

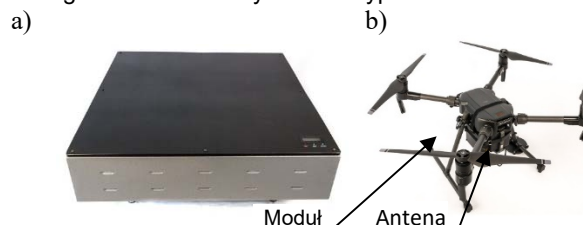
jonowe Lilon, litowo-żelazowo-fosforanowe Li-FePO₄, a najrzadziej niklowo-wodorkowe NiMH [3-6].



Rys.1. Ogniwo litowo polimerowe LiPo [5].

Przykłady rozwiązań bezprzewodowego zasilania

Równoległe do prac badawczych nad poprawą parametrów akumulatorów stosowanych w BSP prowadzone są badania w kierunku ich bezprzewodowego ładowania. Zagadnienie to jest szeroko poruszane w literaturze [6,7,10-20]. Istnieją cywilne rozwiązania komercyjne, w których zastosowano ideę bezprzewodowego ładowania BSP. Przykładem może być rozwiązanie firmy Wibotic w postaci uniwersalnej platformy ładującej „PowerPad” o wymiarach 0,9 m x 0,9 m, rysunek 2a [12]. Wewnątrz platformy umieszczono antenę, moduł generatora ze wzmacniaczem oraz zasilacz. Platforma przeznaczona jest do współpracy z modułami „Onboard Chargers”, które mogą być stosowane w różnego rodzaju BSP. Na rysunku 2b przedstawiono moduł „Onboard Charges” zamontowany do BSP typu DJI M200/M210.



Rys. 2. Rozwiązanie firmy Wibotic a) Platforma ładująca „PowerPad” b) moduł „Onboard Charges” zamontowany do DJI M210 [12].

Zadaniem ww. systemu jest zapewnienie możliwości ładowania BSP wykonującego regularne loty kurierskie, rozpoznawcze lub ratownicze. Urządzenia ładujące montowane są na trasach przelotu BSP,

w miejscach o utrudnionym dostępie takich jak dachy budynków, wysokie maszty, słupy oświetleniowe itp. Zasilanie platformy może być realizowane z sieci prądu przemiennego lub odnawialnych źródeł energii w postaci paneli fotowoltaicznych.

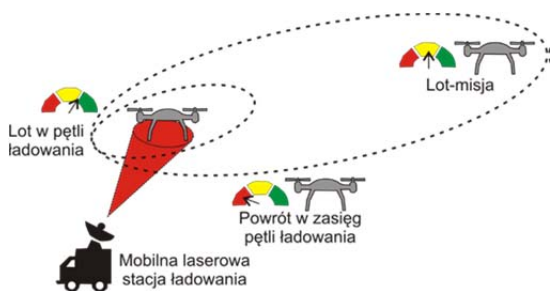
Innym przykładem bezprzewodowego ładowania jest opatentowane w 2018 r. rozwiązanie firmy Global Energy Transmission, w którym ładowanie akumulatora odbywa się w trakcie lotu BSP wewnątrz uzwojenia zawieszzonego kilka metrów nad ziemią rys. 3 [13,14,16].



Rys. 3. Urządzenie ładujące rozwiązanie firmy Global Energy Transmission [13,14].

System ten wymaga stosowania dużej mocy do 12 kW [13, 16]. Statek powietrzny wlatując w obszar transferu energii inicjuje proces ładowania akumulatora. Czas ładowania akumulatora wynosi około 10 minut, pozwala to na 25 minutowy lot [13, 16]. Zaletą systemu jest to, że ładowanie akumulatorów w BSP realizowane jest w trakcie lotu oraz w bezpiecznej odległości od anteny ładującej.

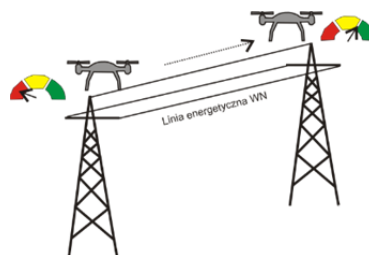
Konieczność stosowania bardzo dużej mocy oraz zakłócenia radiowe, jakie generowane są przez system ładujący stanowi dość istotną wadę tego systemu. Innym sposobem przedłużenia czasu lotu BSP jest wykorzystanie promienia laserowego oświetlającego wiązką laserową o określonej długości fali. Wiązka ta skierowana jest na specjalnie zaprojektowane ogniwa fotowoltaiczne zainstalowane na poszyci statku powietrznego. Służą one do ładowania baterii akumulatorów w trakcie lotu [11, 17]. Na rysunku 4 przedstawiono schemat działania systemu, w którym lot BSP możemy podzielić na trzy fazy. Pierwsza faza to Lot-Misja, druga faza - powrót w rejon ładowania, w trzeciej fazie BSP wykonuje lot w „pętli ładowania” oświetlany przez laser zamontowany na pojeździe. Po osiągnięciu przez akumulatory odpowiedniego poziomu naładowania, statek powietrzny powraca do pierwszej fazy Lot-Misja [11, 18].



Rys. 4. Ładowanie akumulatora BSP promieniem lasera [11, 17, 18].

Zaletą systemu jest, że BSP nie ląduje na żadnej platformie oraz nie zbliża się do przewodów anten nadawczych. Na rysunku 5 przedstawiono koncepcję umożliwiającą wykorzystanie elektroenergetycznych linii wysokiego napięcia do ładowania akumulatorów w trakcie lotu-inspekcji [20].

W trakcie przesyłu energii, wokół linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia generowane jest pole elektromagnetyczne. Poruszający się wzdłuż tej linii BSP wyposażony jest w antenę, w której indukuje się napięcie wykorzystywane w procesie ładowania akumulatora, który jest doładowywany w sposób ciągły. Prezentowane rozwiązanie jest na etapie prób laboratoryjnych [20]. Proces ładowania bezprzewodowego ma swoje wady polegające na ograniczeniach przy przesyłaniu energii oraz bardziej skomplikowanych urządzeniach. Wady tej pozbawione są systemy stykowego ładowania. Przykładem jest rozwiązanie firmy Skycharge przedstawione na rysunku 6 w którym wykorzystuje się specjalne stanowisko startowe wyposażone w pola kontaktowe [21].



Rys. 5. Koncepcja ładowania BSP w trakcie inspekcji linii wysokiego napięcia [20].



Rys. 6. Stykowy system ładowania BSP [21].

Statek powietrzny wyposażono w kontakty stykowe oraz pokładowy układ regulacyjny, który umożliwi ładowanie akumulatorów w stanie gotowości BSP do startu [21].

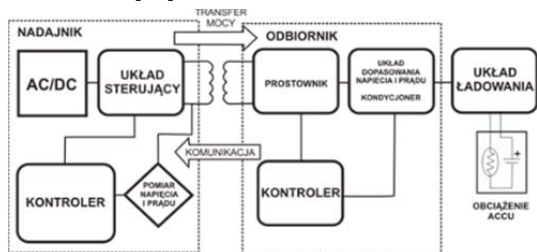
Standardy ładowania bezprzewodowego

Na świecie prowadzone są prace nad wprowadzeniem standardu ładowania bezprzewodowego urządzeń powszechnego użytku. Obecnie istnieją dwie organizacje standardyzacyjne dotyczące ładowania bezprzewodowego. Pierwszą organizacją jest Wireless Power Consortium (WPC), w której od 2008 roku prowadzi się prace nad standardem Qi, gdzie do bezprzewodowej transmisji energii elektrycznej wykorzystywane jest zjawisko indukcji elektromagnetycznej [22, 25, 26]. Drugą organizacją standardyzującą jest AirFuel Alliance, która powstała w 2015 r. z połączenia organizacji Power Matter Alliance (PMA) oraz All For Wireless Power (A4WP). Organizacja AirFuel Alliance prowadzi jednocześnie badania nad dwoma standardami w dziedzinie bezprzewodowego ładowania. Jest to standard AirFuel Inductive oparty o zjawisko indukcji elektromagnetycznej [20] oraz AirFuel Resonant, w którym wykorzystano zjawisko rezonansu [24]. Standardy Qi i AirFuel Inductive wykorzystują zjawisko indukcji elektromagnetycznej, różnią się między sobą zakresem częstotliwości pracy oraz protokołem komunikacji. Standard Qi pracuje w zakresie od 80 kHz do 300 kHz [22, 25, 26] natomiast standard AirFuel Inductive w zakresie od 200 kHz do 300 kHz [23]. Urządzenia ładujące wykorzystujące standard AirFuel Resonant pracują na częstotliwości 6,78 MHz [24]. Wymagania bezpieczeństwa dla urządzeń przemysłowych, wojskowych oraz medycznych nie zalecają

stosowania układów bezprzewodowej transmisji energii w oparciu o standardy przeznaczone dla produktów konsumenckich. Przykładem standardu do zastosowań profesjonalnych jest PowerbyProxi wykorzystująca technologię Dynamic Harmonization Control (DHC) firmy Proxi [34]. Urządzenia ładujące, które wykorzystują PowerbyProxi pracują w zakresie częstotliwości od 50 kHz do 250 kHz [32]. Wspólnym elementem standardów jest konieczność stosowania uzwojenia nadawczego LTX oraz uzwojenia odbiorczego LRX (sprężenie indukcyjne). Uzwojenie nadawcze LTX emituje zmienne pole magnetyczne, które indukuje w uzwojeniu LRX napięcie (SEM) wykorzystywane w procesie ładowania akumulatorów przy zastosowaniu specjalizowanych układów scalonych [6].

Scalone układy ładowania bezprzewodowego

Rozwój urządzeń mobilnych sprawia, że producenci elementów półprzewodnikowych posiadają w swej ofercie coraz większą liczbę scalonych układów ładowania bezprzewodowego. Każdy z produkowanych systemów ładowania bezprzewodowego składa się z układów nadawczych i odbiorczych. Układy te produkowane są m.in. przez STmicroelectronics, Texas Instruments (TI), Analog Devices, Indriustrial Panasonics, Freescale, Renesas, ROHM Semiconductor, XK. Przykładem zaawansowanego systemu ładowania bezprzewodowego jest seria układów BQ produkowanych przez TI, schemat blokowy przedstawiono na rysunku 7. Układ BQ501210 to bezprzewodowy kontroler nadawczy zgodny ze standardem Qi (WPC) v1.2. Przeznaczony jest do współpracy z bezprzewodowymi odbiornikami pracującymi w tym samym standardzie, posiada zdolność do bezprzewodowego przesyłania energii o mocy do 15 W. BQ501210 posiada możliwość komunikacji z odbiornikiem, który jest zasilany bezprzewodowo [28].

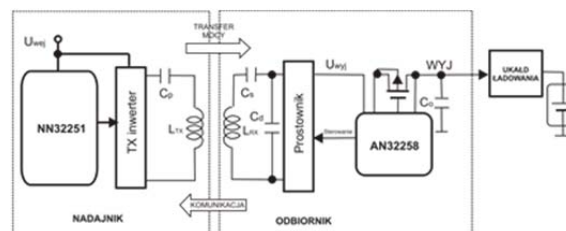


Rys. 7. Schemat blokowy bezprzewodowego systemu przesyłania energii za pomocą układów serii BQ [28, 29].

Innym przykładem systemu do bezprzewodowej transmisji energii są układy typu AN32258A oraz NN32251A. Schemat blokowy systemu przedstawiono na rysunku 8. Pierwszy z nich AN32258A to kontroler odbiornika mocy, który może być używany z dowolnymi ładowarkami bezprzewodowymi zgodnymi z Qi (WPC) v1.1. [27]. Drugi układ (NN32251A) to kontroler nadawczy, współpracujący z urządzeniami odbiorczymi pracującymi w standardzie Qi (WPC) v1.1. [30]. Według producenta sprawność systemu bezprzewodowej transmisji energii wynosi od 50 % do 75 % w zależności od typu użytego urządzenia nadawczego zgodnego z Qi (WPC) v1.1. [29, 32].

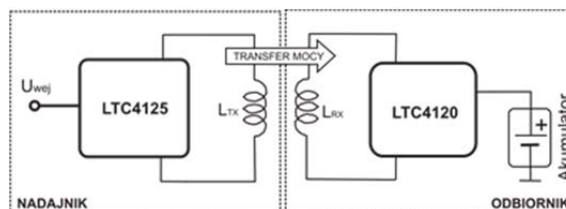
Układ LTC4125 to kontroler, który jest zdolny dostarczyć ponad 5 W mocy do odpowiednio dostrojonego odbiornika. LTC4125 automatycznie dostosowuje częstotliwość sterującą (Auto Resonant™) do częstotliwości rezonansowej anteny [32]. Układ LTC4120 jest odbiornikiem stosowanym do bezprzewodowego transferu

mocy z jednoczesnym ładowaniem pojedynczych ogniw akumulatorów litowo-jonowych, litowo-polimerowych prądem do 400 mA. LTC4120 wykorzystuje technikę Dynamic Harmonization Control (DHC), która moduluje częstotliwość rezonansową obwodu antenowego odbiornika w zależności od zapotrzebowania mocy, [33, 34]. System bezprzewodowej transmisji energii oparty o układy serii XKT charakteryzuje się prostymi rozwiązaniami układowymi (rysunek 10). Przeznaczony jest do stosowania w tanich urządzeniach elektroniki konsumenckiej oraz elektronice amatorskiej. Układ sterownika XKT-412 wraz ze wzmacniaczem XKT335 tworzą układ transmisji energii. Według danych katalogowych [34] maksymalna częstotliwość pracy, jaką może osiągnąć ten układ wynosi 2 MHz.

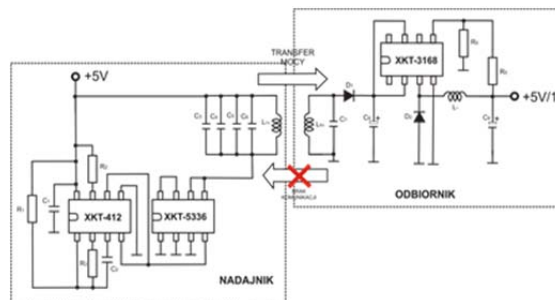


Rys. 8. Schemat blokowy bezprzewodowego systemu przesyłania energii za pomocą układów NN32251, AN32258 [29, 32].

System bezprzewodowego transferu energii przedstawiony na rysunku 9 oparty jest na układach LTC4120 i LTC4125, które wykorzystują technologię PowerbyProxi, pozwalającą na zastosowanie układów w aplikacjach przemysłowych, wojskowych oraz medycznych [32-34].



Rys. 9. Schemat blokowy bezprzewodowego systemu przesyłania energii za pomocą układów LTC4120, LTC4125 [31-33].

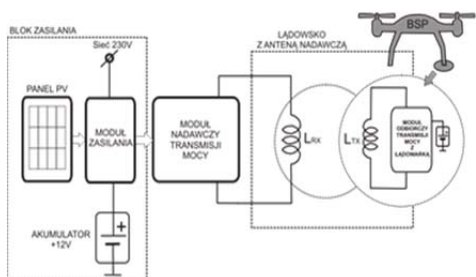


Rys. 10. Schemat bezprzewodowego systemu przesyłania energii za pomocą układów XKT [7, 35-37].

Natomiast sterownik XKT-510 może osiągnąć częstotliwość pracy do 5 MHz. Układ XKT3168 jest odbiornikiem w systemach bezprzewodowej transmisji energii [35, 36]. W przedstawionym na rysunku 9 systemie przesyłania energii z wykorzystaniem układów XKT412 oraz XKT3168 uzyskuje się napięcie wyjściowe o wartości 5 V i wydajności prądowej 1 A [1, 35-37].

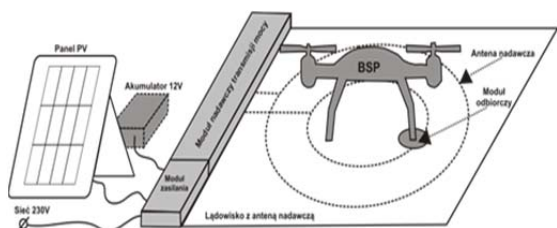
Bezprzewodowe urządzenia ładujące BSP

W opinii Autora warto podkreślić, że producenci seryjnych układów scalonych skupili się na rozwiązaniach, w których moc transferowana z części nadawczej do odbiorczej wynosi maksymalnie 15 W. Jest to poważne ograniczenie przy budowie urządzeń do szybkiego bezprzewodowego ładowania akumulatorów w BSP. Jeżeli czas do pełnego naładowania akumulatora nie jest krytycznym kryterium wyboru to czas przerwy między kolejnymi misjami wykonywanymi za pomocą statków powietrznych musi być odpowiednio długi aby zastosowanie urządzeń ładujących w oparciu o elementy seryjne było zasadne.



Rys. 11. Schemat blokowy bezprzewodowego systemu do ładowania akumulatorów BSP.

W koncepcji bezprzewodowego urządzenia ładującego założono, że układ powinien spełniać następujące zadania: posiadać możliwość autonomicznej pracy w warunkach polowych w różnych warunkach atmosferycznych, masa urządzeń powinna być jak najmniejsza, urządzenie powinno mieć możliwość zasilania z różnych źródeł np. z paneli fotowoltaicznych (rysunek 11), opcjonalnie - układ powinien rozpoczynać ładowanie po wykryciu uprawnionego BSP. W skład systemu do bezprzewodowego ładowania akumulatorów wchodzi: lądowisko z nadajnikiem transmisji mocy, blok zasilania, moduł odbiornika transmisji mocy mocowany do BSP. Moduł nadawczy transmisji mocy zostanie zintegrowany z lądowiskiem, w którym znajdują się anteny nadawcze. Wymiary lądowiska uwarunkowane są wielkością BSP. Założono że powierzchnia lądowiska nie powinna przekroczyć jednego metra kwadratowego. Konstrukcja lądowiska powinna pozwalać na rozwinięcie i zwinięcie w krótkim czasie. Masa lądowiska powinna umożliwiać swobodne przenoszenie przez obsługę. Blok zasilania powinien dostarczyć niezbędną ilość energii elektrycznej do funkcjonowania modułu nadawczego. W skład bloku zasilania wchodzi: moduł zasilający, panel fotowoltaiczny PV oraz akumulator pełniący funkcję magazynu energii. Moduł zasilający powinien umożliwić korzystanie z różnych źródeł energii elektrycznej: sieci 230V, instalacji samochodowej 12/24V, zewnętrznego akumulatora 12V oraz panelu fotowoltaicznego PV. Na rysunku 12 przedstawiono przykładową wizualizację bezprzewodowego systemu ładowania na podstawie przedstawionej koncepcji.



Rys. 12. Bezprzewodowy system ładowania akumulatorów w BSP.

Konstrukcja modułu odbiorczego powinna mieć ograniczoną do niezbędnego minimum masę, wielkość oraz odpowiednio dobrany kształt. Dodatkowy moduł odbiorczy mocy nie może wpływać na właściwości lotne BSP. W skład konstrukcji modułu odbiorczego wchodzi: uzwojenie odbiorcze, kontroler z układem ładowania akumulatora. Montaż modułu wymaga ingerencji w konstrukcję BSP, co nie zawsze jest możliwe. Idealnym rozwiązaniem byłaby integracja modułu na etapie projektowania bezzałogowego statku powietrznego. W ramach wstępnych testów potwierdzono możliwość ładowania akumulatorów przy włączonym zasilaniu BSP. Na rysunku 13 przedstawiono zaprojektowane i wydrukowane za pomocą drukarki 3D stanowisko do przewodowego ładowania akumulatorów (rys. 13).



Rys. 13. Stanowisko do przewodowego ładowania akumulatorów w BSP.

Do przyszłych badań wybrano komercyjnie dostępne moduły ładowania bezprzewodowego, typu TX24VHS (rysunek 14).



Rys. 14. Moduł ładowania bezprzewodowego TX24VHS

Docelowo w urządzeniu przejawia się zastosowanie rozwiązań autorskich modułów ładowania bezprzewodowego.

Podsumowanie

W opracowaniu dokonano przeglądu współczesnych elektrochemicznych źródeł zasilania stosowanych w BSP. Przedstawiono literaturowe przykłady rozwiązań układów do bezprzewodowego zasilania bezzałogowych statków powietrznych z których rozwiązanie firmy Wibotic jako jedyne dostępne jest komercyjnie. W zarysie przedstawiono obowiązujące na świecie standardy ładowania bezprzewodowego. Omówiono przykłady specjalizowanych, półprzewodnikowych układów scalonych takich producentów jak: Texas Instruments (TI), Analog Devices, Industrial Panasonic. Zwrócono uwagę na to, że omawiane układy scalone do bezprzewodowego ładowania mogą pracować z mocą do kilkunastu watów. Niewielkie moce sprawiają, że czas potrzebny do pełnego naładowania akumulatorów o dużej pojemności wydłuża się. Ograniczenie to stawia pod znakiem zapytania możliwość ich wykorzystania w bezprzewodowych urządzeniach do szybkiego ładowania BSP. W koncepcji założono, że czas przerw między poszczególnymi misjami BSP będzie wystarczająco długi do tego, aby naładować

akumulator bez potrzeby ingerencji obsługi. W dalszych badaniach przewiduje się opracowanie konstrukcji uzwojenia nadawczego i odbiorczego. Zaprojektowanie nadajnika i odbiornika w oparciu o specjalizowane układy scalone, łądowniska z anteną nadawczą oraz skonstruowanie modułu zasilającego.

Autor: dr inż. Krzysztof Górski, Akademia Wojsk Lądowych, Katedra Zarządzania Innowacyjnymi Projektami, ul. Czajkowskiego 109, 51-147 Wrocław, E-mail: krzysztof.gorski@awl.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (Regulation (EU) 2019/947 and Regulation (EU) 2019/945).
- [2] Rozporządzenie wykonawcze komisji (UE) 2019/947 w sprawie przepisów i procedur dotyczących eksploatacji bezzałogowych statków powietrznych.
- [3] P. Bogusz, M. Korkosz, J. Prokop, P. Wygonik, Badania laboratoryjne ogniwi elektrycznych przeznaczonych do zastosowania w napędzie hybrydowym bezzałogowego aparatu latającego, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, 2, 2012.
- [4] P. Bogusz, M. Korkosz, P. Wygonik, M. Dudek, B. Lis, Analiza wpływu źródła zasilającego na właściwości bezszczotkowego silnika prądu stałego z magnesami trwałymi przeznaczonego do napędu bezzałogowego aparatu latającego, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 91, Nr 5, 2015.
- [5] <http://www.honcell.com/products/info/id/141.html> dostęp z dnia 11/03/2023 r.
- [6] M. LaFay, Drony dla bystrzaków, *Helion*, Gliwice, 2017.
- [7] K. Detka, K. Górecki, Wireless Power Transfer—A Review, *Energies*, 15(19), 2022, 7236;
- [8] <https://www.komputerswiat.pl/aktualnosci/sprzet/powerpa-d-bezprzewodowe-ladowanie-dronow/w7d3b83> dostęp z dnia 20/04/2023 r.
- [9] C. W. Park, H. T. Chung, A study on drone charging system using wireless power transmission, *International Journal of Trned in Research and Development*, volume 3(6), Busan, South Korea, 2016.
- [10] A. Rohan, M. Rabah, M. Talha, Sung-Ho Kim, Development of Intelligent Drone Battery of Charging System Based on Wireless Power Transmission Using Hill Climbing Algoryt, *Applied System Innovation*, Kusan, South Korea, 2018.
- [11] M. Lu, M. Bagheri, A. P. James, T. Phung, Wireless Charging Techniques for UAVs: A Review, Reonce-ptualization, and Extension, *IEEEAccess*, vol. 6, 2018.
- [12] <https://www.wibotic.com/> dostęp z dnia 23/04/2020 r.
- [13] <https://mlodytechnik.pl/news/29444-ladowanie-dronow-w-powietrzu>, dostęp z dnia 23/04/2023 r.
- [14] <http://getcorp.com/> dostęp z dnia 23/04/2023 r.
- [15] Wireless charging system for drone, Patent KR101564254B1, South Korea, 25/10/2015 r.
- [16] Systems and methods for wireless power transferring, Patent no. US 9,979,239 B2, USA, 22/05/2018 r. [17] G. A. Landis, Photovoltaic receivers for laser beamed power in space, in Proc. Conf. Rec. 22nd IEEE Photovoltaic Spec. Conf., Oct. 1991, pp. 1494-1502.
- [18] M. C. Achtelik, J. Stumpf, D. Gurdan, and K.-M. Doth, Design of a flexible high performance quadcopter platform breaking the MAV endurance record with laser power beaming, in Proc. IEEE/RSJ, Sep. 2011, 5166_5172.
- [19] M. Simic, C. Bil, and V. Vojisavljevic, Investigation in wireless power transmission for UAV charging, *Procedia Comput. Sci.*, vol. 60, no. 1, 2015, 1846-1855.
- [20] V. Gupta, A. Kandhalu, and R. Rajkumar, Energy harvesting from electromagnetic energy radiating from AC power lines, in Proc. 6th Workshop Hot Top. Embed. Netw. Sensors (HotEmNets), 2010.
- [21] <https://www.skycharge.de/> dostęp z dnia 25.04.2023 r.
- [22] <https://www.wirelesspowerconsortium.com/qi/> dostęp z dnia 27/04/2020 r.
- [23] <https://airfuel.org/wireless-power/electromagnetic-coupling/> dostęp z dnia 27/04/2020 r.
- [24] <https://airfuel.org/wireless-power/rf-charging/> dostęp z dnia 27/04/2020 r.
- [25] K. Detka, K. Górecki, P. Ptak, Model of an Air Transformer for Analyses of Wireless Power Transfer Systems, *Energies*, 16(3), 2023, 1391.
- [26] M. Jaworowska, Bezprzewodowe ładowanie-standardy i ich implementacje, *Elektronik*, Luty, 2018.
- [27] https://industrial.panasonic.com/content/data/SC/ds/ds4/AN32258A_E.pdf dostęp z dnia 03/05/2022 r.
- [28] <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq501210.pdf> dostęp z dnia 03/05/2022 r.
- [29] <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq51013b.pdf> dostęp z dnia 03/05/2022 r.
- [30] https://media.digikey.com/pdf/Data_Sheets/Panasonic_Electronic_Components/NN32251A.pdf dostęp z dnia 03/05/2022 r.
- [31] https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/product-selector-card/2PB_wptics.pdf dostęp z dnia 04/05/2020 r.
- [32] <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/4125f.pdf> dostęp z dnia 04/05/2020 r.
- [33] <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC4120-4120-4.2.pdf> dostęp z dnia 04/05/2020 r.
- [34] https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/product-information/LTC4120_FAQ_21Nov2013.pdf dostęp z dnia 04/05/2020 r.
- [35] <https://datasheetspdf.com/pdf-file/1253033/ETC/XKT-412/1> dostęp z dnia 04/05/2020 r.
- [36] http://aitendo3.sakura.ne.jp/aitendo_data/product_img/ic/power/XKT-510/XKT-510.pdf dostęp z dnia 04/05/2022 r.
- [37] Win-Jet Luo, C. Bambang Dwi Kuncoro, Yean-Der Kuan, Wireless Power Hanger Pad for Portable Wireless Audio Device Power Charger Application, *Energies*, 2020.