

Rafał MIŚKIEWICZ  
Patryk ANCZEWSKI

## UKŁAD BEZSTYKOWEGO ŁADOWANIA BATERII DLA BEZZAŁOGOWYCH STATKÓW POWIETRZNYCH

**STRESZCZENIE**      *W artykule przedstawiono opis indukcyjnego bezstykowego układu ładowania baterii litowo-polimerowych zastosowanego przy ładowaniu bezzałogowych statków powietrznych. Układ zasilany jest z sieci jednofazowej. Zaprezentowano budowę systemu, strukturę sterowania, procedurę projektowania transformatora powietrznego oraz wyniki badań eksperymentalnych.*

**Słowa kluczowe:** *ładowanie bezstykowe, transformator powietrzny, bezzałogowe statki powietrzne*

**DOI:** 10.5604/01.3001.0010.5029

### 1. WSTĘP

---

W ciągu ostatnich lat możemy zaobserwować rozwój technologii bezzałogowych statków latających, potocznie zwanych dronami (ang. unmanned aerial vehicles, UAV). Tego typu maszyny znajdują zastosowanie w wielu obszarach takich jak technika militarna, dozór powietrzny, czy produkcja filmowa. W przyszłości prawdopodobnie drony wykorzystywane będą również w transporcie.

Jednym z głównych problemów wykorzystania dronów w różnego rodzaju aplikacjach jest ograniczony zasięg operacyjny i fizyczna potrzeba obsługi ich ładowania. W związku z tym bez wątpienia opracowanie systemu zautomatyzowanego bezstykowego ładowania dronów pozwoli na zniwelowanie tych wad, co przyczyni się do ich szerszego i skutecznego wykorzystania. W artykule przedstawiono koncepcję układu bezstykowego ładowania baterii wykorzystywanych w bezzałogowych statkach powietrznych.

---

**dr inż. Rafał MIŚKIEWICZ, mgr inż. Patryk ANCZEWSKI**  
e-mail: [r.miskiewicz; p.anczewski]@iel.waw.pl

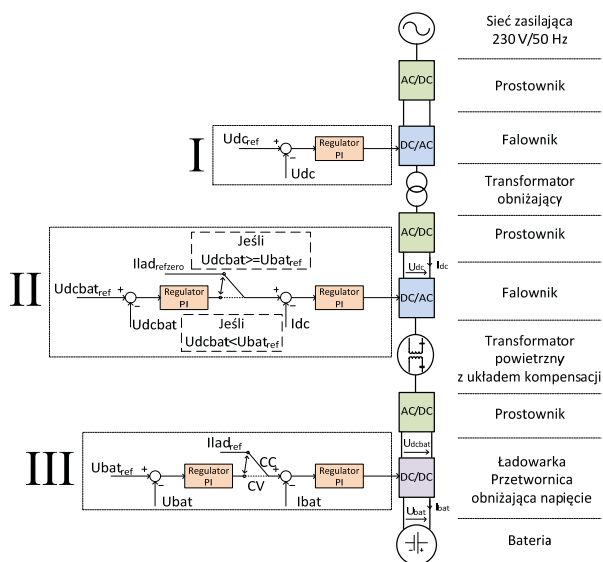
Instytut Elektrotechniki, Zakład Napędów Elektrycznych,  
ul. M. Pozaryskiego 28, 04-703 Warszawa

## 2. SCHEMAT SYSTEMU BEZSTYKOWEGO ZASILANIA I OPIS UKŁADU REGULACJI

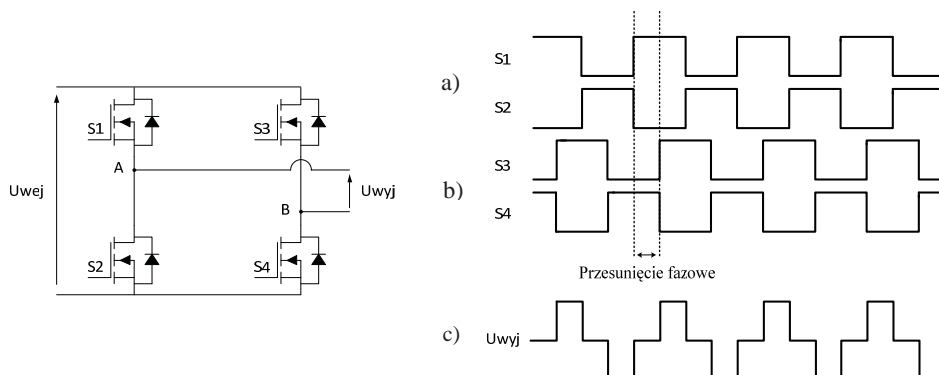
Schemat blokowy struktury zasilania i sterowania jednokierunkowego indukcyjnego systemu bezstykowego zasilania (ISBZ) zawiera trzy układy regulacji (rys. 1). Metodą sterowania falownikami zasilającymi transformator rdzeniowy i powietrzny jest metoda przesunięcia fazowego (ang. phase-shift, rys. 2). Zmiana wypełnienia napięcia wyjściowego przekształtnika polega na pracy pierwszej gałęzi ze stałym wypełnieniem 50% i przesuwaniu fazy drugiej względem pierwszej [8-9]. Pierwszy układ regulacji (I) przedstawiony na rysunku 1 ma za zadanie stabilizować wartość napięcia  $U_{DC}$  w obwodzie przekształtnika rezonansowego zasilającego transformator powietrzny. Drugi układ regulacji (II) składa się z regulatora napięcia i prądu, które kontrolują wartość napięcia  $U_{DCbat}$  ładowarki, natomiast część trzecia (III) odpowiada za sterowanie pracą ładowarki i osiągnięcie wymaganej charakterystyki procesu ładowania baterii. Konieczność regulacji napięcia  $U_{DCbat}$  przez falownik po stronie pierwotnej transformatora powietrznego wymaga zastosowania modułu komunikacji bezprzewodowej, przekazującego mierzone wartości napięcia  $U_{DCbat}$  do układu regulacji falownika. Dodatkowo zaimplementowany został warunek stabilizacji napięcia w obwodzie DC ładowarki w momencie zakończenia procesu ładowania baterii.

Główne założenia układu:

- układ zasilany z sieci jednofazowej 230 V;
- zastosowanie transformatora niesymetrycznego;
- częstotliwość pracy transformatora powietrznego 80 kHz;
- praca transformatora ze współczynnikiem sprzężenia magnetycznego  $k$  powyżej 0,3;
- moc ładowania dostępna dla danej baterii;
- bateria ładowana podczas postoju.



Rys. 1. Schemat struktury zasilania i sterowania jednokierunkowego układu ISBZ

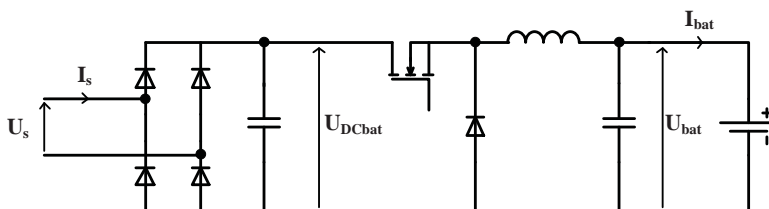


**Rys. 2. Metoda przesunięcia fazowego dla mostka tranzystorowego:**

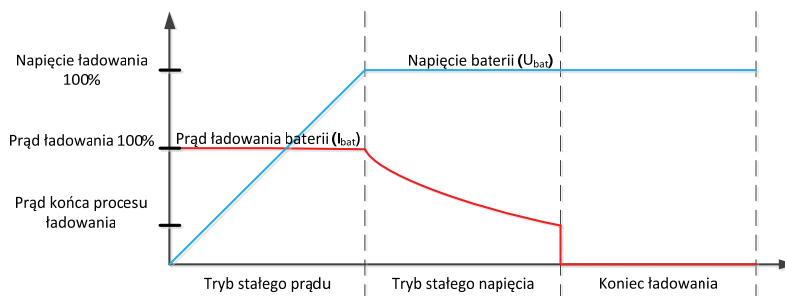
a) sygnały sterujące dla łączników w pierwszej gałęzi mostka, b) sygnały sterujące dla łączników w drugiej gałęzi mostka, c) przebieg napięcia wyjściowego mostka

### 3. UKŁAD ŁADOWANIA BATERII

Topologia głównego obwodu ładowarki (rys. 3) bazuje na układzie przetwornicy DC/DC obniżającej napięcie (ang. Step-down). Dodatkowo na wejściu układu zastosowano prostownik mostkowy diodowy. Ładowarka ma za zadanie przeprowadzenie procesu ładowania baterii, zgodnie z przedstawioną na rysunku 4 charakterystyką. Podana charakterystyka przedstawia powszechnie znany i stosowany algorytm ładowania baterii stałym prądem/napięciem(ang. constant – current/voltage, C-C/V).



**Rys. 3. Obwód główny przekształtnika po stronie wtórnej transformatora powietrznego**



**Rys. 4. Charakterystyka ładowania baterii C-C/V**

W procesie ładowania baterii według algorytmu C-C/V można wyróżnić trzy stany pracy: tryb stałego prądu, tryb stałego napięcia i koniec procesu ładowania. W trybie stałego prądu ładowarka pracuje jako źródło prądowe o ustalonej wartości prądu, który jest dobrany do konkretnej baterii i typu jej ogniw. Wówczas napięcie na zaciskach baterii zaczyna rosnąć. Trwa to do momentu, gdy napięcie na baterii osiągnie wartość do której ma zostać naładowana. Wtedy ładowarka przechodzi w tryb pracy stałego napięcia i pracuje jako źródło napięciowe utrzymujące stałą wartość napięcia baterii, natomiast prąd ładowania zaczyna maleć. Gdy prąd zmaleje do wartości progowej następuje koniec procesu ładowania baterii. Opisany przebieg procesu jest jednym z najczęściej stosowanych algorytmów ładowania baterii [1], [7].

Indukcyjny system bezstykowego ładowania został zaprojektowany do ładowania pakietu baterii litowo-polimerowej ZIPPY Compact 8S o następujących parametrach:

- pojemność:  $5800 \text{ mAh} = 5,8 \text{ A} \cdot 1 \text{ C}$ ,
- maksymalny możliwy prąd ładowania:  $5 \text{ C} = 5 \cdot 5,8 \text{ Ah} = 29 \text{ A}$ ,
- prąd rozładowania:  $25 \text{ C} = 145 \text{ A}$ , w trybie turbo  $35 \text{ C} = 203 \text{ A}$ ,
- napięcie znamionowe:  $29,6 \text{ V}$ ,
- waga:  $1025 \text{ g}$ .

Uwzględniając podane parametry baterii, ustalono następujące parametry pracy ładowarki: maksymalny prąd ładowania  $5,8 \text{ A}$  i maksymalne napięcie naładowania baterii  $32,8 \text{ V}$ .

#### 4. TRANSFORMATOR POWIETRZNY

---

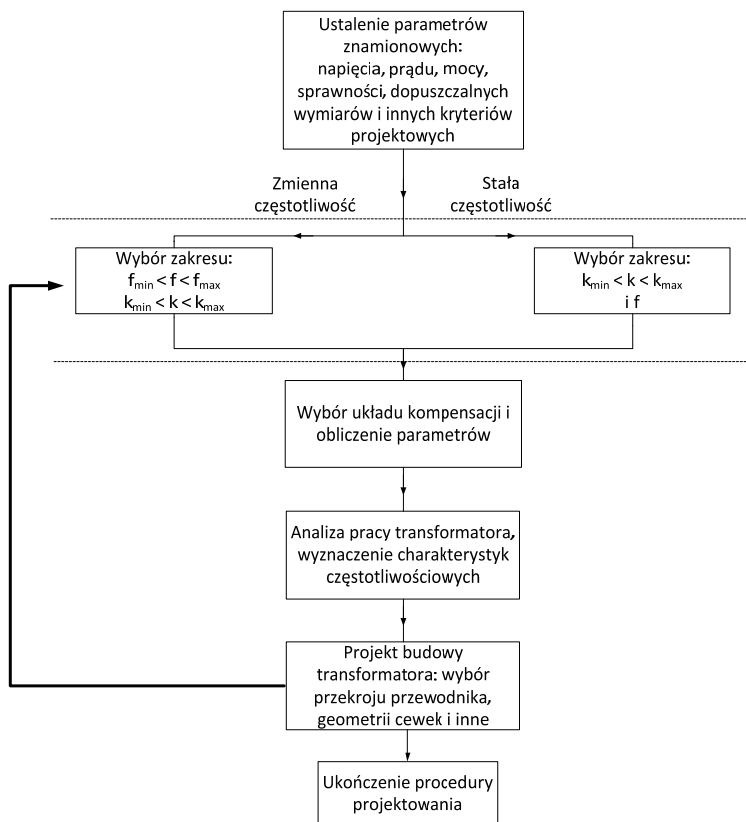
Ważnym elementem systemu zasilania bezstykowego, od którego zależą parametry pracy całego układu jest transformator powietrzny, składający się ze dwóch sprzężonych ze sobą cewek. W celu poprawnego zaprojektowania transformatora powietrznego należy skorzystać z procedury projektowania przedstawionej na rysunku 5.

Pierwszym krokiem w zaprezentowanej procedurze jest ustalenie parametrów znamionowych pracy transformatora, ze szczególnym uwzględnieniem zakresu wartości współczynnika sprzężenia magnetycznego  $k$  i wymiarów transformatora. Zależnie od wybranej metody sterowania, można wyróżnić dwa warianty projektowania: dla układu pracującego ze zmienną częstotliwością lub układ ze stałą częstotliwością pracy.

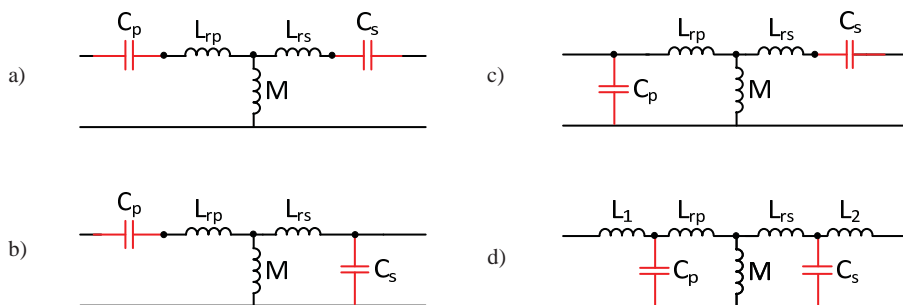
Kolejnym krokiem jest wybór układu kompensacji i dobór odpowiednich wartości elementów biernych układu kompensacji, wartości indukcyjności uzwojeń transformatora i częstotliwości rezonansowej układu. Na rysunku 6 zostały przedstawione układy kompensacji indukcyjności rozproszenia transformatora powietrznego [10-11]. Dzięki zastosowaniu układów kompensacji zwiększamy sprawność i zdolność przesyłową transformatora powietrznego. Dla każdego z układów kompensacji charakterystyki częstotliwościowe modułu napięcia, prądu i mocy opisujące układ znacząco różnią się od siebie. Dlatego wybór odpowiedniego układu kompensacji jest jednym z istotnych parametrów projektowych.

Końcowym etapem procedury jest budowa transformatora wraz z doбором odpowiedniego przekroju uzwojenia i wybranie ich odpowiedniej geometrii. Jeśli podczas procesu budowy transformatora nie uda nam się spełnić założonych przyjętych wymagań

należy rozważyć zmianę częstotliwości pracy układu lub skorygować założenia projektowe [1-4].



Rys. 5. Procedura projektowania transformatora powietrznego



Rys. 6. Układy kompensacji indukcyjności rozproszenia:

a) układ szeregowo-szeregowy, b) szeregowo-równoległy, c) równoległo-szeregowy, d) równoległo-równoległy

W przeprowadzonej analizie częstotliwościowej transformatora proces ładowania baterii zamodelowano odpowiednimi wartościami rezystancji obciążenia  $R_{bat}$  [12]. Wartości rezystancji wyznaczono na podstawie następujących zależności:

$$R_{bat} = \begin{aligned} & \text{dla trybu CC: } R_{batcc} = \frac{U_{bat}}{I_{ladmax}} = \frac{U_{bat}}{5,8 \text{ A}} \end{aligned} \quad (4.1)$$

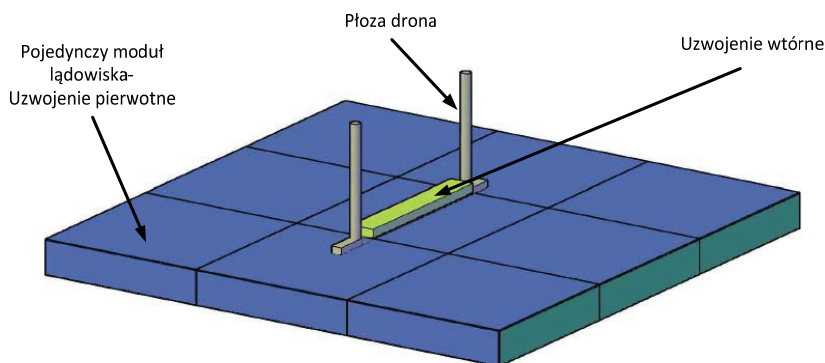
$$\text{dla trybu CV: } R_{batcc} = \frac{U_{batmax}}{I_{lad}} = \frac{32,8 \text{ V}}{I_{lad}} \quad (4.2)$$

$$U_{bat} = 24 - 32,8 \text{ V}$$

$$I_{bat} = 5,8 - 0,5 \text{ A}$$

W wyniku przeprowadzonej analizy wybrano układ kompensacji szeregowo-szeregowy oraz wartości indukcyjności własnych uzwojeń i kondensatorów kompensujących. Jednym z założeń projektowych jest asymetria uzwojeń transformatora w celu zmniejszenia wagi uzwojenia wtórnego transformatora i dzięki większej powierzchni uzwojenia pierwotnego uzyskanie wysokiej wartości współczynnika sprzężenia nawet w przypadku nieidealnego umiejscowienia cewek wtórnej i pierwotnej. Dobrane parametry układu są następujące:  $L_p = 30 \mu\text{H}$ ,  $L_s = 20 \mu\text{H}$ ,  $C_p = 132 \text{ nF}$ ,  $C_s = 198 \text{ nF}$ .

Na rysunku 7 przedstawiono koncepcję budowy lądowiska dla drona jako strony pierwotnej transformatora i zamocowania strony wtórnej na dronie. Lądowisko składa się z wielu modułów. Każdy z modułów zawiera uzwojenie pierwotne transformatora i na podstawie wykrycia miejsca lądowania załączany jest odpowiedni moduł najbliższej strony wtórnej systemu ISBZ.



**Rys. 7. Rysunek koncepcji lądowiska i mocowania uzwojenia na płozie drona**

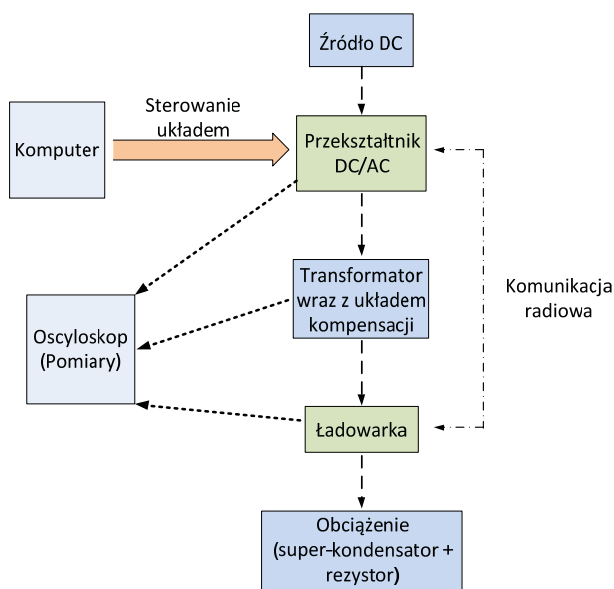
Uzwojenie wtórne zamocowane jest na płozie bezzałogowego statku powietrznego, co pozwala na pracę transformatora z dużą wartością współczynnika sprzężenia magnetycznego. Pozwala to uzyskać wysoką sprawność przesyłu energii przez transformator.

## 5. WYNIKI BADAŃ LABORATORYJNYCH

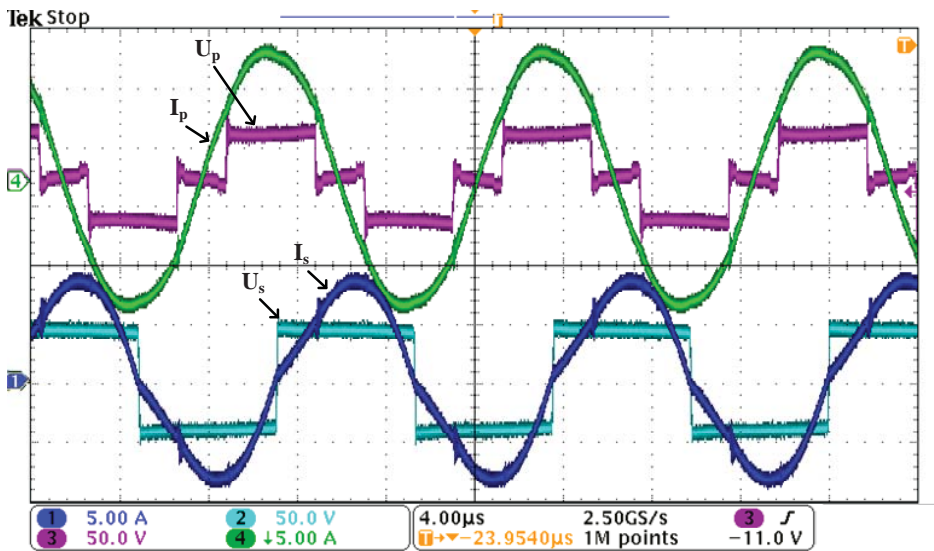
Wyniki badań modelu laboratoryjnego zostały przeprowadzone w układzie przedstawionym na rysunku 8. Wszystkie badania przeprowadzono przy użyciu regulowanego źródła napięcia stałego o wartości 40 V, podłączonego do obwodu DC przekształtnika rezonansowego. Obciążeniem układu był superkondensator firmy EPCOS o pojemności 33 F i napięciu znamionowym 42 V wraz z podłączonym równolegle rezystorem rozładowczym, w celu umożliwienia wykonywania pomiarów i sprawdzenia poprawności działania w krótkim czasie. Komunikacja pomiędzy ładowarką, a zasilaczem odbywała się za pomocą modułów radiowych nRF905 433 MHz. Częstotliwość pracy falownika wynosi 80 kHz, natomiast ładowarka pracuje z częstotliwością 50 kHz. Wartości indukcyjności własnych uzwojeń transformatora powietrznego i kondensatorów kompensujących modelu laboratoryjnego wynoszą odpowiednio:  $L_p = 29,58 \mu\text{H}$ ,  $L_s = 20,78 \mu\text{H}$ ,  $C_p = 191,74 \text{ nF}$ ,  $C_s = 135,15 \text{ nF}$

Przebiegi napięć i prądów po stronie pierwotnej i wtórnej transformatora powietrznego zostały przedstawione na rysunku 9, dla wartości współczynnika sprzężenia magnetycznego  $k = 0,3$  w stanie ładowania stałym prądem o wartości 5,8 A, natomiast na rysunku 10 prąd ładowania baterii wynosi 2 A. Dla współczynnika  $k = 0,4$  na rysunku 11 i 12 również zostały przedstawione napięcia i prądy transformatora powietrznego dla prądów ładowania baterii 2 A i 5,8 A.

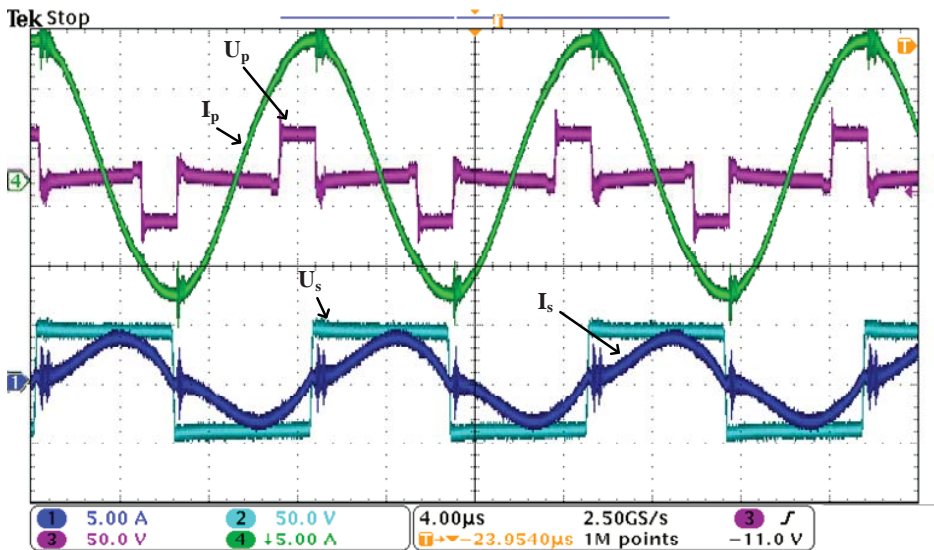
Na rysunku 13 przedstawiony został proces ładowania superkondensatora, przy współczynniku sprzężenia magnetycznego  $k = 0,3$ . W trybie ładowania stałym prądem wartość referencyjna prądu ładowania wynosi 5,8 A, a wartość napięcie naładowania 32,8 V. Na rysunku 14 pokazano poziom tętnień prądu ładowania w trybie ładowania C-C.



Rys. 8. Schemat blokowy modelu laboratoryjnego

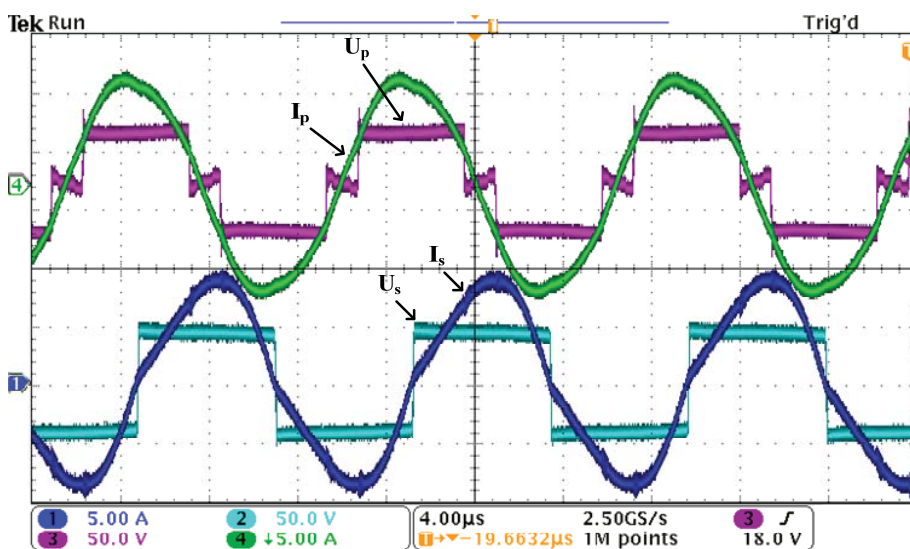


Rys. 9. Przebiegi napięć i prądów transformatora dla współczynnika sprzężenia  $k = 0,3$  i prądu ładowania 5,8 A: 1 – prąd po stronie wtórnej ( $I_s$ ), 2 – napięcie strony wtórnej ( $U_s$ ), 3 – napięcie po stronie pierwotnej ( $U_p$ ), 4 – prąd strony pierwotnej ( $I_p$ )

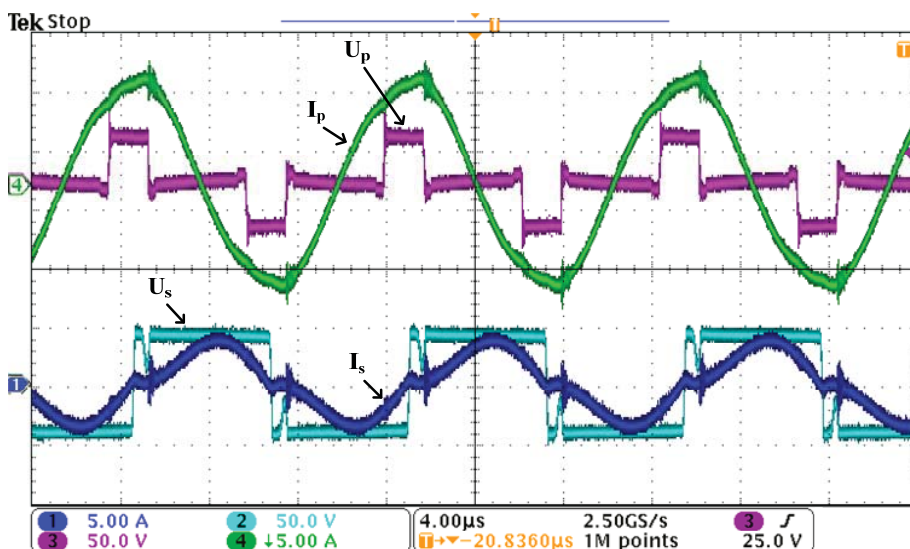


Rys. 10. Przebiegi napięć i prądów transformatora dla współczynnika sprzężenia  $k = 0,3$  i prądu ładowania 2,0 A: 1 – prąd po stronie wtórnej ( $I_s$ ), 2 – napięcie strony wtórnej ( $U_s$ ), 3 – napięcie po stronie pierwotnej ( $U_p$ ), 4 – prąd strony pierwotnej ( $I_p$ )

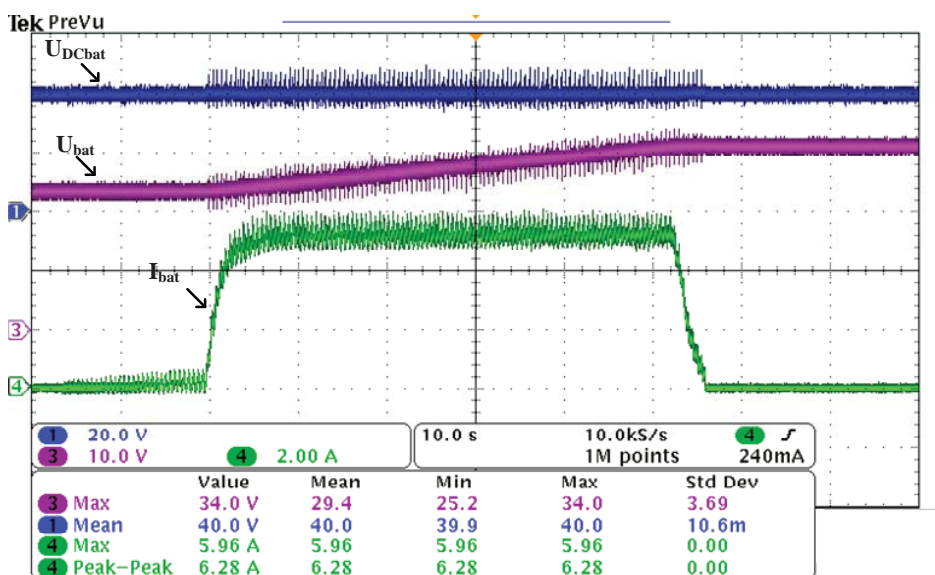




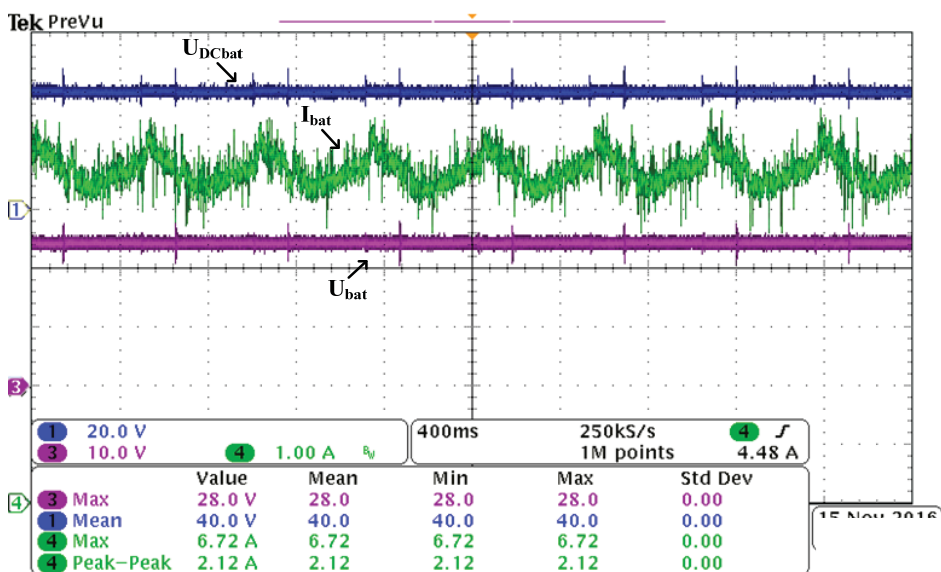
Rys. 11. Przebiegi napięć i prądów transformatora dla współczynnika sprzężenia  $k = 0,4$  i prądu ładowania 5,8 A: 1 – prąd po stronie wtórnej ( $I_s$ ), 2 – napięcie strony wtórnej ( $U_s$ ), 3 – napięcie po stronie pierwotnej ( $U_p$ ), 4 – prąd strony pierwotnej ( $I_p$ )



Rys. 12. Przebiegi napięć i prądów transformatora dla współczynnika sprzężenia  $k = 0,4$  i prądu ładowania 2,0 A: 1 – prąd po stronie wtórnej ( $I_s$ ), 2 – napięcie strony wtórnej ( $U_s$ ), 3 – napięcie po stronie pierwotnej ( $U_p$ ), 4 – prąd strony pierwotnej ( $I_p$ )



Rys. 13. Proces ładowania baterii: 1 – napięcie wejściowe w obwodzie dc ładowarki ( $U_{dcbat}$ ), 3 – napięcie na baterii (superkondensatorze) ( $U_{bat}$ ), 4 – prąd ładowania baterii ( $I_{bat}$ )



Rys. 14. Przedstawienie poziomu tętnień prądu ładowania w stanie ładowania stałym prądem: 1 – napięcie wejściowe w obwodzie dc ładowarki ( $U_{dcbat}$ ), 3 – napięcie na baterii (superkondensatorze) ( $U_{bat}$ ), 4 – prąd ładowania baterii ( $I_{bat}$ )

## 6. WNIOSKI

---

Na podstawie badań na stanowisku eksperymentalnym i przeprowadzeniu wielu rozważań teoretycznych można wyciągnąć następujące wnioski:

- Wybrana struktura indukcyjnego systemu bezstykowego zasilania ISBZ pozwala na skuteczne przeprowadzenie procesu ładowania baterii, zapewniając odpowiedni poziom bezpieczeństwa układu i kontrolę nad jego najważniejszymi parametrami.
- Zastosowanie niesymetrycznych uzwojeń transformatora powietrznego powoduje zmniejszenie wartości wzmacnienia napięciowego układu kompensacji i transformatora wraz ze zwiększaniem się wartości współczynnika sprzężenia  $k$ .
- Metoda sterowania zmiany przesunięcia fazowego (rys. 2) pozwala na skuteczną kontrolę parametrów układu i utrzymanie zadanej wartości napięcia w obwodzie DC, po stronie wtórnej układu ładowarki. Wadą wybranej metody jest przełączanie łączników przekształtnika przy dużych wartości prądu, w szczególności przy niskich wartościach współczynnika wypełnienia, co sprawia że wskazane jest zastosowanie nowoczesnych tranzystorów MOSFET z węgla krzemu (SiC), pozwalających na skuteczne zredukowanie poziomu strat łączeniowych.
- Charakterystycznym zjawiskiem dla pracy systemu ISBZ ze stałą częstotliwością jest, niezmiennosc amplitudy prądu po stronie pierwotnej, niezależnie od zmian wartości obciążenia układu przy stałej wartości napięcia w obwodzie DC po stronie wtórnej i danej wartości współczynnika sprzężenia magnetycznego  $k$ .
- Zaimplementowany algorytm ładowania C-C/V zapewnia skuteczne prowadzenie procesu ładowania baterii.

Dalsza rozbudowa struktury systemu powinna umożliwić budowę w pełni zautomatyzowanego systemu ładowania dronów.

## LITERATURA

1. Bosshard R., Badstubner U., Kolar J. W., and Stevanovic I.: Comparative evaluation of control methods for Inductive Power Transfer. In 2012 International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), pp. 1–6, 2012.
2. Vázquez J., Roncero-Sánchez P., and García X. del T.: Design, implementation issues and performance of an inductive power transfer system for electric vehicle chargers with series-series compensation. IET Power Electron., vol. 8, no. 10, pp. 1920–1930, Oct. 2015.
3. Kazmierkowski M. P. and Moradewicz A. J.: Contactless energy transfer (CET) systems-A review. In 15th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition, EPE-PEMC 2012 ECCE Europe, pp. 31–36, 2012.
4. Kazmierkowski M. P. and Moradewicz A. J.: Unplugged but connected: Review of contactless energy transfer systems. IEEE Ind. Electron. Mag., 2012.
5. Liu Y., Hu P. A., and Madawala U. K.: Maximum power transfer and efficiency analysis of different inductive power transfer tuning topologies. In 2015 IEEE 10th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), pp. 649–654, 2015.

6. Weixiang Shen, Thanh Tu Vo, and Kapoor A.: Charging algorithms of lithium-ion batteries: An overview. In 2012 7th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), pp. 1567–1572, 2012.
7. Abdel Monem M., Trad K., Omar N., Hegazy O., Mantels B., Mulder G., Van den Bossche P., and Van Mierlo J.: Lithium-ion batteries: Evaluation study of different charging methodologies based on aging process. *Appl. Energy*, vol. 152, pp. 143–155, 2015.
8. Covic G. A. and Boys J. T.: Modern Trends in Inductive Power Transfer for Transportation Applications. *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Power Electron.*, vol. 1, no. 1, pp. 28–41, Mar. 2013.
9. Diekhans T. and De Doncker R. W.: A Dual-Side Controlled Inductive Power Transfer System Optimized for Large Coupling Factor Variations and Partial Load. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 11, pp. 6320–6328, Nov. 2015.
10. Covic G. A. and Boys J. T.: Inductive Power Transfer. *Proc. IEEE*, vol. 101, no. 6, pp. 1276–1289, Jun. 2013.
11. Sallan J., Villa J. L., Llombart A., and Sanz J. F.: Optimal Design of ICPT Systems Applied to Electric Vehicle Battery Charge. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 56, no. 6, pp. 2140–2149, Jun. 2009.
12. Qu X., Han H., Wong S.-C., Tse C. K. and Chen W.: Hybrid IPT Topologies With Constant Current or Constant Voltage Output for Battery Charging Applications. *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 11, pp. 6329–6337, Nov. 2015.

## SPIS OZNACZEŃ

$U_{DC}$  – wartość napięcia w obwodzie DC falownika zasilającego transformator powietrzny

$U_{DCbat}$  – wartość napięcia w obwodzie DC ładowarki

$k$  – współczynnik sprzężenia magnetycznego

$f$  – częstotliwość

$U_{bat}$  – zakres napięcia na baterii

$U_{batmax}$  – maksymalna wartość napięcia ładowania baterii

$I_{bat}$  – zakres prądu ładowania baterii

$I_{batmax}$  – maksymalna wartość prądu ładowania baterii

$L_p$  – wartość indukcyjności własnej uzwojenia pierwotnego transformatora powietrznego

$L_s$  – wartość indukcyjności własnej uzwojenia wtórnego transformatora powietrznego

$C_p$  – wartość kondensatora kompensującego po stronie pierwotnej transformatora powietrznego

$C_s$  – wartość kondensatora kompensującego po stronie wtórnego transformatora powietrznego

$L_{rp}$  – wartość indukcyjności rozproszenia uzwojenia pierwotnego transformatora powietrznego

$L_{rs}$  – wartość indukcyjności rozproszenia uzwojenia wtórnego transformatora powietrznego

$U_p$  – napięcia po stronie pierwotnej transformatora

$I_p$  – prąd strony pierwotnej transformatora

$U_s$  – napięcia po stronie pierwotnej transformatora

$I_s$  – prąd strony pierwotnej transformatora

$U_{wej}$  – napięcie w obwodzie DC falownika jednofazowego

$U_{wyj}$  – napięcie wyjściowe falownika jednofazowego

Przyjęto do druku dnia 06.09.2017 r.

## CONTACTLESS CHARGER FOR UNMANNED AERIAL VEHICLES

Rafał MIŚKIEWICZ, Patryk ANCZEWSKI

**ABSTRACT** *This paper presents a description of the lithium-polymer battery contactless charger system for unmanned aerial vehicles. The charger is supplied from an AC source. The article shows a structure of the system, control structure, design procedure of the air transformer and presents experimental results.*

**Keywords:** *contactless energy transfer, air transformer, unmanned aerial vehicles*

**Dr inż. Rafał MIŚKIEWICZ** pracuje w Instytucie Elektrotechniki od 2008 roku, obecnie na stanowisku asystenta w Zakładzie Napędów Elektrycznych jako Kierownik Pracowni. Specjalizuje się w zakresie przekształtników rezonansowych oraz systemów bezstykowego przesyłu energii.



**Mgr inż. Patryk ANCZEWSKI** – w roku 2017 ukończył studia drugiego stopnia na wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej, uzyskując dyplom mgr inż. elektryka ze specjalnością Elektronika Przemysłowa. Od 2015 roku jest pracownikiem Instytutu Elektrotechniki w Zakładzie Napędów Elektrycznych. Obecnie jego głównym obszarem zainteresowań są bezstykowe systemy zasilające oraz ładowarki dla pojazdów elektrycznych.

