

Baterijny, bezprzewodowy układ zasilania z systemem dwukierunkowego przesyłu energii przystosowany do pracy w podziemiach kopalń

W artykule zaprezentowano wyniki prac realizowanych w Akademii Górniczo-Hutniczej, których głównym celem jest skonstruowanie nowoczesnego i ekonomicznego rozwiązania baterijnego układu zasilania z systemem dwukierunkowego bezprzewodowego przesyłu energii, przystosowanego do pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem i umożliwiającego budowę wysokosprawnych układów zasilających. Istotą prezentowanych rozwiązań jest platforma sprzętowa, umożliwiająca dwukierunkowy bezprzewodowy przesył energii o sprzężeniu indukcyjnym w zakresie średnich częstotliwości (od 50 kHz do 300 kHz) i z wysoką sprawnością (przy przerwie izolacyjnej 4 mm, osiągnięta sprawność całkowita od baterii do obciążenia wynosi powyżej 72%) i wykorzystanie jej do budowy układów zasilania. Dodatkowo proponowane rozwiązania będą dedykowane do pracy w bardzo trudnych warunkach środowiskowych oraz w systemach o podwyższonym stopniu niezawodności. Przedstawiony baterijny układ zasilania z systemem dwukierunkowego bezprzewodowego przesyłu energii, przystosowany do pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem, umożliwi realizację wielu specyficznych aplikacji. W proponowanym rozwiązaniu bateria dostarcza energię w sposób bezprzewodowy do odbiornika, jak i w sposób bezprzewodowy jest również ładowana. Brak jakichkolwiek styków mechanicznych podwyższa niezawodność oraz stopień bezpieczeństwa eksploatowanych urządzeń, co osiągnięto między innymi poprzez znaczne zmniejszenie wartości prądów zwarcia w odniesieniu do klasycznego iskrobezpiecznego źródła baterijnego w stosunku nawet 1 do 5. Ułatwi to znacząco serwis i obsługę oraz pozwoli podnieść efektywność wykorzystania urządzeń zasilanych baterijnie w górnictwie podziemnym. Przewidywane wdrożenie opracowanych systemów zasilania, modułów baterii bezstykowej i ładowarek, mogących pracować zarówno na powierzchni jak i pod ziemią, pozwoli rozwijać innowacyjne rozwiązania oraz udostępni wysokosprawne i wydajne źródła bateryjne dla branży górniczej.

1. WPROWADZENIE

Układy zasilania z systemem bezprzewodowego przesyłu energii za sprawą projektu WiTricity prowadzonego w Massachusetts Institute of Technology oraz projektu WREL prowadzonego przez firmę Intel znalazły się w kręgu zainteresowania czołowych ośrodków badawczo-rozwojowych i koncernów elektronicznych [1,2]. Technologia ta obejmuje urządzenia pobierające moc rzędu kilku-kilkunastu mikrowatów (np. transpondery i sensory w pasywnej technice RFID) poprzez ładowarki telefonów, radiotelefonów

i laptopów o mocach rzędu kilku-kilkunastu watów, poprzez układy ładowania ogni w pojazdach o mocach kilku kilowatów, aż po układy mocy rzędu kilkuset kilowatów dla szybkiego transportu kolejowego (IPS – Inductive Power Supply) [3,4,5]. Ze względu na ogromną rozpiętość aplikacji oraz poziomów dostarczanych mocy konstrukcja wykorzystywanych układów jest bardzo różna. Elementami wspólnymi bezprzewodowych układów zasilania, w przeważającej większości przypadków, są: indukcyjne sprzężenie pomiędzy źródłem mocy a odbiornikiem oraz rezonansowy charakter wymuszania prądów i napięć w obwodach mocy. Z tego też powodu w badaniach nad taki-

mi układami wykorzystuje się techniki modelowania pól magnetycznych w celu otrzymania kształtu i rozkładu przestrzennego pola, gwarantującego uzyskanie wysokiej sprawności w przekazie energii [1,6]. Dokładniejszej analizie poddaje się również elementy indukcyjne, w których optymalizacji podlega kształt i rozkład uzwojeń, kształt i parametry materiałów magnetycznych oraz termiczne właściwości całej konstrukcji [10]. Następnym istotnym elementem w układzie bezprzewodowego przesyłu energii jest konfiguracja układu rezonansowego, w której wymuszane są sinusoidalne przebiegi prądów i napięć. W tym wypadku istnieje pewna wspólna część z układami stosowanymi w grzejnictwie indukcyjnym (elektrotermii), jednak ze względu na większe częstotliwości pracy oraz możliwość uzyskiwania w układach rezonansowych i kluczach większych przepięć i przetężeń występuje też większe bogactwo konfiguracji pracy tych układów. Do dnia dzisiejszego są one rozwijane, a niektóre z nich znajdują ochronę patentową. Intensywnie jest również rozwijana tematyka optymalnego sterowania przekształtników, a w szczególności techniki miękkiego przełączania w zerze napięcia (ZVS) lub w zerze prądu w kluczu (ZVC) [6-9].

Systemy bezprzewodowego zasilania pozwalają budować nowoczesne aplikacje, których wyróżnikiem jest brak kabli i styków, co jest cechą niezmiernie pożądaną w urządzeniach mobilnych. Zapewniają przy tym elastyczność i stosunkowo niskie koszty wdrożenia, przez co można spodziewać się wkrótce znacznego zwiększenia liczby urządzeń wyposażonych w układy zasilające tego typu. W dłuższej perspektywie realne wydaje się również przyjęcie jakiegoś standardu, który mógłby zaspokoić potrzeby szerokiej gamy urządzeń zasilanych bateryjnie, a przez to zmniejszyć ilość i różnorodność ładowarek. Możliwości te nabierają szczególnego znaczenia w przestrzeniach trudno dostępnych, w których panują ekstremalne warunki środowiskowe, gdzie istnieje zwiększone ryzyko wybuchu a stosowanie styków mechanicznych i połączeń kablowych jest utrudnione lub wręcz niemożliwe [4,9].

Baterijne układy zasilania z systemem bezprzewodowego przesyłu energii są coraz szerzej stosowane w produktach komercyjnych [1,2]. Największym rynkiem dla tego typu rozwiązań są obecnie systemy bezprzewodowego ładowania baterii w telefonach komórkowych i przenośnych urządzeniach komputerowych. Znaczące zainteresowanie obserwuje się również w sektorze samochodowym [7]. Ze względu na swoje unikalne cechy systemy bezprzewodowego przesyłu energii mogą znaleźć zastosowanie wszędzie tam, gdzie występuje silnie korozyjna atmosfera,

duże wibracje lub elementy źródła i odbiornika energii przemieszczają się względem siebie.

W Polsce tematyka bezprzewodowego przesyłu energii również cieszy się zasłużonym zainteresowaniem. W Akademii Górniczo-Hutniczej, podczas realizacji pracy doktorskiej pt. „Układ bezstykowego przekazu energii elektrycznej”, powstała cała seria artykułów Roberta Stali, przedstawiająca całościowo problematykę projektowania i budowy tego typu układów [6]. Z kolei w pracowni autorów artykułu prowadzone są intensywne prace rozwojowe nad rezonansowymi układami przetwarzania energii, w tym również przystosowanymi do pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Część z zaproponowanych układów została zgłoszona do ochrony patentowej i obejmuje rozwiązania przekształtników DC-AC, dedykowanych do bezstykowych układów zasilania oraz konstrukcję elementów magnetycznych [11-13]. Z kolei w Zakładzie Elektrycznych Napędów Obrabiarkowych Instytutu Elektrotechniki Politechniki Warszawskiej rozwijane są systemy bezprzewodowego zasilania wielosiowych robotów na liniach montażowych (elektronika, motoryzacja), które wymagają często doprowadzenia energii elektrycznej poprzez jedną lub więcej części ruchomych. Buduje się tam także układy bezprzewodowego zasilania dla przenośnych komputerów [4,5]. Innym ośrodkiem, który również zajął się tą tematyką, jest Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki w Politechnice Śląskiej, w której zrealizowana została praca doktorska „Analiza właściwości oraz optymalizacja konstrukcji transformatora energoelektronicznego z uzwojeniami koncentrycznymi silnie sprzężonymi” Mariusza Stępnia. Dodatkowo w tej Katedrze, wspólnie z Fundacją Rozwoju Kardiochirurgii z Zabrze, rozwijana jest koncepcja bezprzewodowego zasilania sztucznego serca [9]. W zakresie dużych mocy w Zakładzie Trakcji Elektrycznej w Politechnice Gdańskiej prowadzone są prace związane z bezstykowym zasilaniem pojazdów trakcyjnych [14]. Należy podkreślić, iż konwencjonalne sposoby przyłączania elektrycznych urządzeń ze względu na swą prostotę znakomicie sprawdzają się w warunkach normalnych, lecz w trudnych warunkach środowiskowych konieczne jest stosowanie specjalistycznych sprzęgów łączących. Do istotnych wymagań, spotykanych w układach tego typu, można zaliczyć:

- możliwość pracy w strefach zagrożonych wybuchem (kopalnie, laboratoria chemiczne, przemysł chemiczny i petrochemiczny),
- możliwość pracy urządzenia pod wodą lub w dużej wilgotności,

- zapewnienie dodatkowego stopnia swobody ruchu częściom ruchomym,
- zasilanie wszczepianych/wszczepionych implantów (medycyna), bez konieczności ingerencji przez ciało pacjenta,
- ładowanie baterii telefonów lub pojazdów elektrycznych,
- zasilanie czujników w robotach przemysłowych.

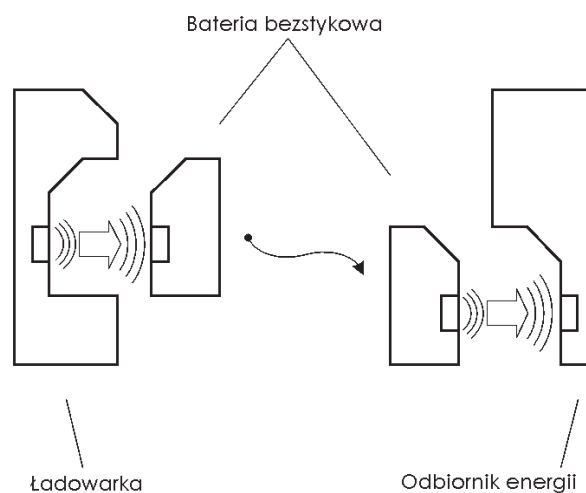
Większość z dotychczas wprowadzonych rozwiązań jest silnie dedykowana do konkretnej aplikacji i nie obejmuje możliwości pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem. Ze względu na zwiększanie stopnia bezpieczeństwa i możliwość budowy bardziej wydajnych iskrobezpiecznych źródeł energii konieczne staje się opracowanie skalowalnego rozwiązania, mogącego zaspokoić potrzeby wielu wymagających aplikacji. Proponowany baterijny układ zasilania z systemem dwukierunkowego bezprzewodowego przesyłu energii, przystosowanego do pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem, jest oryginalną ofertą dla górnictwa i innych wymagających aplikacji i może stać się istotnym elementem wpływającym na podniesienie niezawodności układów zasilania. Nowatorskie w skali europejskiej rozwiązanie odpowiada na stale rosnące zapotrzebowanie rynku na specjalistyczne, ale zarazem elastyczne rozwiązania w dziedzinie zasilania mobilnych urządzeń pracujących w trudnych warunkach środowiskowych [11-13].

2. OPIS ROZWIĄZANIA

Głównym celem prezentowanych badań jest skonstruowanie nowoczesnego i ekonomicznego rozwiązania baterijnego układu zasilania z systemem dwukierunkowego bezprzewodowego przesyłu energii, przystosowanego do pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem i umożliwiającego budowę wysokosprawnych układów zasilających. W proponowanym rozwiązaniu bateria dostarcza energię w sposób bezprzewodowy do odbiornika, jak i w sposób bezprzewodowy jest również ładowana. Brak jakichkolwiek styków mechanicznych zwiększa stopień niezawodności zasilania oraz podwyższa stopień bezpieczeństwa eksploatowanych urządzeń. Ułatwi to znacząco serwis i obsługę urządzeń, a poprzez możliwość ładowania baterii pod ziemią, znacząco skrócony zostanie czas jej obsługi. Polepszy to efektywność jej wykorzystania, co wydaje się być istotną zaletą dla urządzeń zasilanych bateryjnie w górnictwie podziemnym. Zwiększenie bezpieczeństwa załóg górniczych i ludzi pracujących

w strefach zagrożonych wybuchem będzie osiągnięte również poprzez znaczne zmniejszenie wartości prądów zwarcia w odniesieniu do klasycznego iskrobezpiecznego źródła baterijnego w stosunku nawet 1 do 5.

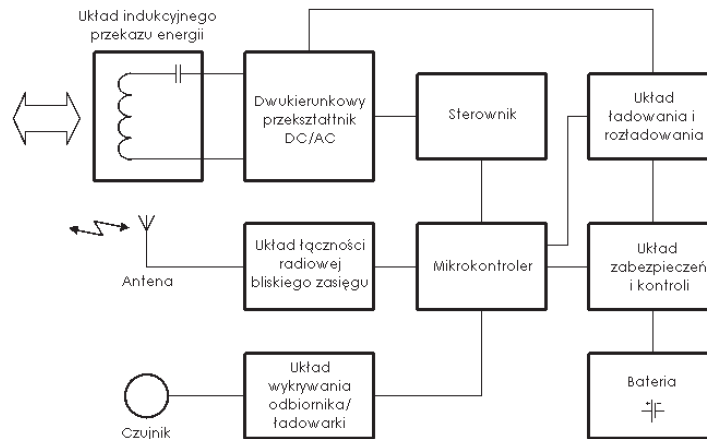
Istotą prezentowanych badań nad bateryjnym układem zasilania jest skonstruowanie platformy sprzętowej, umożliwiającej dwukierunkowy bezprzewodowy przesył energii z wysoką sprawnością (przy przerwie izolacyjnej 4 mm osiągnięta sprawność całkowita od baterii do obciążenia wynosi powyżej 70%) i wykorzystanie jej do budowy baterijnego układu zasilania. Dodatkowo proponowane rozwiązania będą dedykowane do pracy w bardzo trudnych warunkach środowiskowych oraz w systemach o podwyższonym stopniu niezawodności. Przedstawiony baterijny układ zasilania z systemem dwukierunkowego bezprzewodowego przesyłu energii, przystosowany do pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem, umożliwi realizację wielu specyficznych aplikacji. Aby przybliżyć potencjalne możliwości opisywanych rozwiązań, na rysunku 1 przedstawiono najważniejsze elementy systemu.



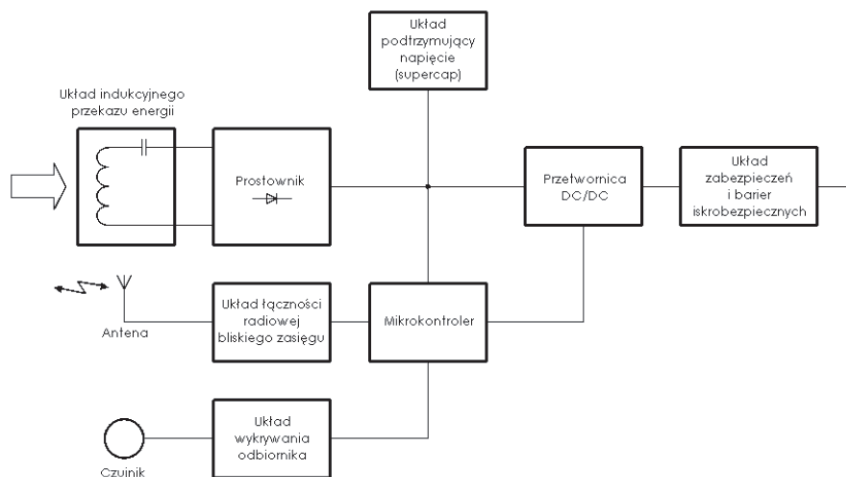
Rys. 1. Elementy składowe baterijnego systemu zasilania umożliwiającego dwukierunkowy, bezprzewodowy przesył energii

2.1. Bateria bezstykowa

Podstawowym elementem układu zasilania z systemem dwukierunkowego bezprzewodowego przesyłu energii, przystosowanego do pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem, jest bateria bezstykowa. Zawiera ona ogniwa litowo-jonowe, układy zabezpieczeń oraz ładowania i rozładowania umożliwiające wykorzystywanie jej w środowisku kopalnianym. Mikrokontroler zarządza pracą całej baterii i ma możliwość dwukierunkowej łączności poprzez



Rys. 2. Schemat blokowy baterii bezstykowej



Rys. 3. Schemat blokowy odbiornika energii baterii bezstykowej

moduł radiowy z urządzeniami zewnętrznymi. Dzięki temu możliwa jest rejestracja historii działania baterii i określania jej aktualnego stanu pracy. Czujnik z układem wykrywania odbiornika i ładowarki pozwala na uruchamianie układu konwersji mocy (tzn. sterownika, przekształtnika DC-AC i indukcyjnego układu przekazu energii) tylko w momentach, kiedy jest to konieczne. W chwili wykrycia ładowarki mikrokontroler automatycznie przechodzi w tryb nadzoru i kontroli ogniwa litowo-jonowego. Na rysunku 2 przedstawiono schemat blokowy baterii bezstykowej.

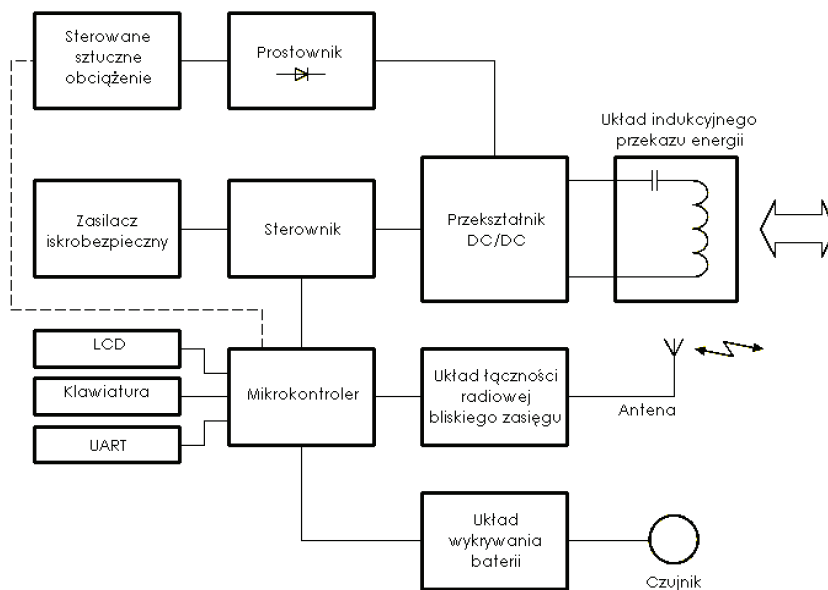
2.2. Układ odbiornika energii baterii bezstykowej

Układ odbiornika energii baterii bezstykowej współpracuje z baterią bezstykową i jest elementem odpowiedzialnym za dostarczenia do odbiornika iskrobezpiecznych napięć i prądów na wymaganym

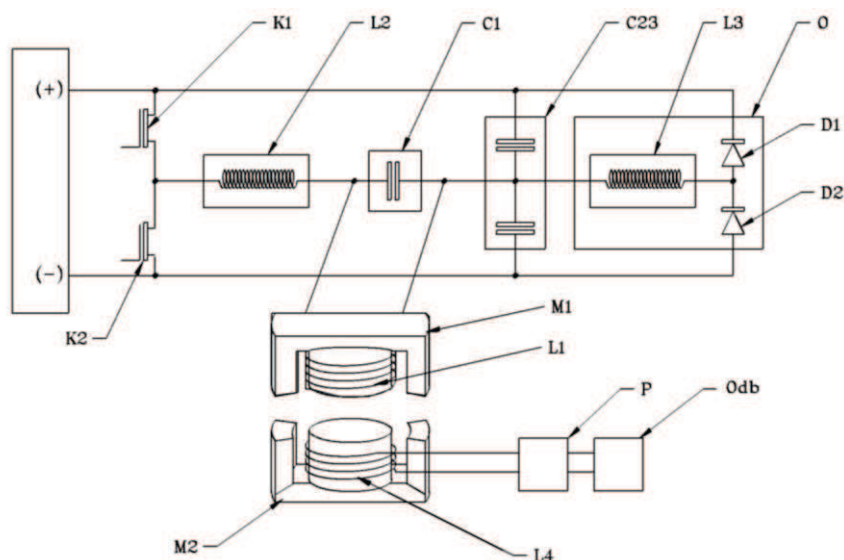
poziomie. Po wykryciu przez baterię bezstykową obecności odbiornika energii następuje ładowanie, jeśli to konieczne, układu podtrzymania napięcia i nawiązanie łączności poprzez krótko-zasięgowy moduł radiowy. Na podstawie otrzymywanych komunikatów bateria bezstykowa dostarcza do odbiornika energię na odpowiednim poziomie. Na rysunku 3 przedstawiono schemat blokowy odbiornika energii baterii bezstykowej.

2.3. Ładowarka bezstykowa

Ładowarka bezstykowa może zostać wykonana w dwóch wersjach: przystosowanej do pracy na powierzchni (np. lampownia zakładu górniczego) oraz przystosowanej do pracy w strefach zagrożonych wybuchem (np. cecha M2). Układy w niej zastosowane pozwalają na podgląd i rejestrację stanu ogniwa i baterii, umożliwiając przy tym zarówno przeprowadzenie procesu ładowania, rozładowania baterii, jak i wymiary



Rys. 4. Schemat blokowy ładowarki bezstykowej



Rys. 5. Schemat układu do bezprzewodowego przekazu energii elektrycznej [11]

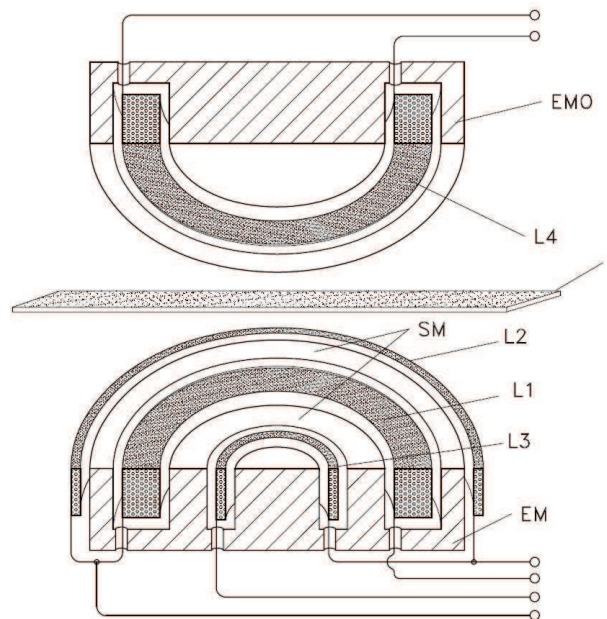
oprogramowania poprzez dwukierunkowy układ łączności radiowej. Dzięki możliwości ładowania pod ziemią obsługa urządzeń bateryjnych pracujących w podziemiach kopalń zostanie znacznie uproszczona, co przełoży się również na zmniejszenie kosztów użycia tych układów. Na rysunku 4 przedstawiono schemat blokowy ładowarki bezstykowej.

3. OPIS GŁÓWNYCH ROZWIĄZAŃ TECHNICZNYCH

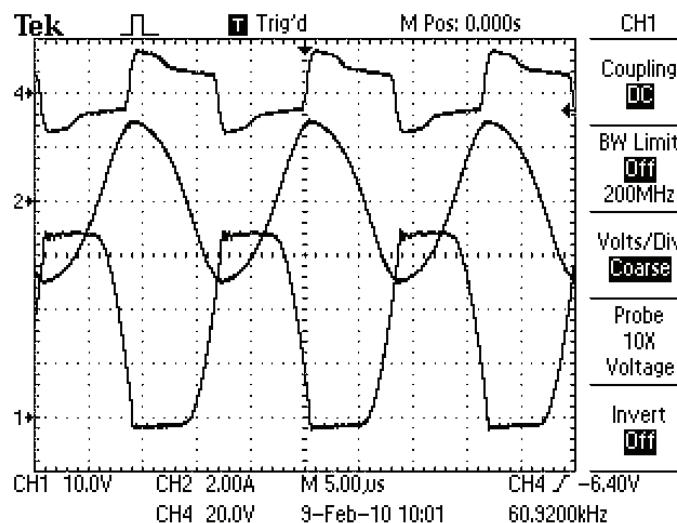
W zaproponowanym rozwiązaniu sposób bezprzewodowego przesyłania energii opiera się na wyko-

rzystaniu rezonansowego sprzężenia dwóch cewek, oddalonych od siebie od 2 do 15 mm [13]. Na rysunku 5 przedstawiono schemat układu bezprzewodowego przekazu energii, który oparto na szeregowo-równoległym obwodzie rezonansowym, wyposażonym w ogranicznik dobroci (L4, D1, D2), zwracający nadmiar energii krążący w układzie do źródła zasilania [11]. Z kolei na rysunku 6 przedstawiono zintegrowany element magnetyczny, który pozwala na zmniejszenie liczby kształtek ferromagnetycznych oraz na poprawę sprawności energetycznej układu poprzez odpowiednie ukształtowanie pola indukcji magnetycznej [12].

Przebiegi czasowe układu bezprzewodowego przekazu energii z rysunku 5 przedstawiono na ry-



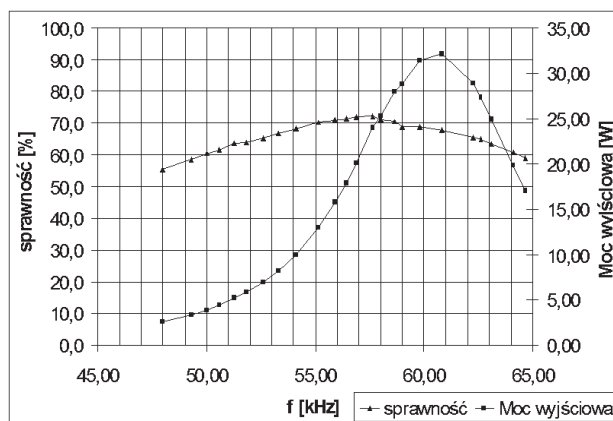
Rys. 6. Budowa zintegrowanego elementu magnetycznego dedykowanego do bezprzewodowego przekazu energii [12]



Rys. 7. Przebiegi czasowe układu bezprzewodowego przekazu energii (rys. 5): napięcie na bramce sterującej klucza K2 – kanał 4, prąd wyjściowy – kanał 2, napięcie wyjściowe – kanał 1 przy zasilaniu 12VDC, mocy wejściowej $P_{in}=47W$ i wyjściowej $P_{out}=32W$

sunku 7. Napięcia na bramce sterującej klucza K2 zobrazowano w kanale 4, prąd wyjściowy w kanale 2, zaś napięcie na uzwojeniu wtórnym w kanale 1. Całość pomiarów została wykonana przy zasilaniu $U_{in}=12$ VDC, mocy wejściowej $P_{in}=47$ W i mocy wyjściowej $P_{out}=32$ W. W zbudowanym modelu laboratoryjnym układu bezstykowego przekazu energii z przerwą izolacyjną równą 10 mm i zakresem częstotliwości pracy od 48 do 65 kHz oraz przy rezystancji obciążenia równej $R_{load}=30$ Ω uzyskano sprawność powyżej 70%. Była ona liczona jako stosunek mocy na obciążeniu (po prostowniku) do mocy źródła zasilana (rys. 8). Otrzymany wynik

jest tym bardziej zachęcający, że zaproponowana struktura nadaje się do dwukierunkowego przesyłania energii, jak również jest skalowalna i pozwala na budowę układów o mocy od kilku watów do kilkuset watów. Do istotnych zalet przedstawionego rozwiązania należy również niski poziom emisji elektromagnetycznej, uzyskany dzięki niemal sinusoidalnym kształtom prądów w obwodach rezonansowych bez względu na wartość obciążenia. Ten aspekt konstrukcji, ze względu na wzrost w górnictwie liczby eksploatowanych systemów elektronicznych, staje się ważnym czynnikiem wpływającym na wybór rozwiązań.



Rys. 8. Wykres sprawności i mocy wyjściowej dla układu bezprzewodowego przekazu energii z rysunku 5

4. PODSUMOWANIE

Przedstawione w artykule rozwiązania bateryjnego układu zasilania z systemem dwukierunkowego bezprzewodowego przesyłu energii, przystosowanego do pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem, opracowywane w Akademii Górniczo-Hutniczej, są oryginalną ofertą dla górnictwa i innych wymagających aplikacji i mogą stać się istotnym elementem wpływającym na podniesienie niezawodności układów zasilania. Przewidywane wdrożenie opracowanych systemów zasilania urządzeń górniczych, modułów baterii bezstykowej i ładowarek mogących pracować zarówno na powierzchni jak i pod ziemią, pozwoli rozwijać innowacyjne rozwiązania i udostępni zaawansowane technologicznie źródła energii dla branży górniczej.

Bezprzewodowy baterijny układ zasilania będzie mógł spełnić nowe, wyższe wymagania i zapotrzebowanie producentów urządzeń górniczych na bezprzewodową energię elektryczną. Dodatkowo ze względu na otwartość i skalowalność rozwiązania podmioty gospodarcze będą mogły rozwijać kolejne, własne produkty i usługi (np. urządzenia radiowe, sieci czujników, systemy głośnomówiące, itp.), wykorzystując opracowane i zgłoszone do ochrony patentowej układy bezstykowego przekazu energii [11,12].

Cechą charakterystyczną proponowanego układu zasilania jest możliwość pracy w urządzeniach używanych bezpośrednio w procesie wydobywczym (np. kombajn, przenośnik, obudowa zmechanizowana, kołowrót, kruszarka, łączność głosowa w ścianie wydobywczej itp.), co implikuje ogromne wymagania dotyczące niezawodności.

Brak jakichkolwiek styków mechanicznych sprzyja osiągnięciu tego celu, jak również podwyższa stopień bezpieczeństwa eksploatowanych urządzeń.

Publikacja jest współfinansowana przez Unię Europejską z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Projektu: wnd-poig.01.03.02-12-009/10 „Ochrona patentowa zintegrowanego modułu reaktancyjnego dedykowanego do bezprzewodowego przesyłu energii elektrycznej”.

Literatura

1. Kurs A., Moffatt R., Soljačić M.: 2010 “Simultaneous mid-range power transfer to multiple devices”, 26 January 2010, Applied Physics Letters 96, 044102 (2010).
2. <http://software.intel.com/en-us/videos/wireless-resonant-energy-link-wrel-demo/>.
3. Miśkiewicz R., Moradewicz A.: 2009, „Bezstykowe zasilanie komputerów przenośnych”, Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), ISSN 0033-2097, r. 85 nr 3/2009.
4. Moradewicz A.: 2006, „Transformatorowe systemy bezprzewodowego przesyłu energii BPE – studia symulacyjne”, prace Instytutu Elektrotechniki Politechniki Warszawskiej, zeszyt 226, 2006.
5. Artykuł redakcyjny 2009, „Bezprzewodowe zasilanie urządzeń elektronicznych”, Elektronik, 09-2009 str. 62.
6. Piróg S., Stala R., Gąsiorek S.: „Bezstykowe zasilanie ruchomych, separowanych odbiorników energii elektrycznej”, Przegląd Elektrotechniczny, 2003 R. 79 nr 5 s. 326–333., 2003 R. 79 nr 6 s. 410–414.
7. Xun Liu, S. Y. (Ron) Hui, “Optimal Design of a Hybrid Winding Structure for Planar Contactless Battery Charging Platform”, IEEE Transactions On Power Electronics, vol. 23, no. 1, January 2008 p.455.
8. Mecke R., Rathge C., Ecklebe A., Lindemann A. 2007, “Bidirectional switches for matrix converter in contactless energy transmission systems”, EPE 2005, Dresden IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.7 No.5, May 2007.
9. Cieśla T., Kaczmarczyk Z. Stepień M., Kustos R., Grzesik B.: 2010, Prototyp układu bezprzewodowej transmisji energii elektrycznej, Pomiar Automatyka Kontrola, nr 8 2010, str. 922-925.
10. Kazimierzczuk M.: “High-Frequency Magnetic Components Book Description”, John Wiley & Sons, ISBN: 0470714549, New York, 2009.
11. Worek C.: Zgłoszenie Patentowe, P 381975, 2007-03-14, „Sposób bezkontaktowego transferu energii elektrycznej i układ bezkontaktowego transferu energii elektrycznej”.
12. Worek C., Maślanka R.: Zgłoszenie patentowe: Zintegrowany moduł reaktancyjny, C, Urząd Patentowy RP, 2009-12-14, P-389 907, 12/2009.
13. <http://www.wsn.agh.edu.pl/?q=pl/bateria&page=0%2C0>.
14. Judek S., Karwowski K.: „Bezstykowe zasilanie pojazdów trakcyjnych”, XI Ogólnopolska Konferencja Naukowa SEMTRAK 2004 i III Szkoła Kompatybilności Elektromagnetycznej w Transporcie, Kraków-Zakopane 2004.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów