

Aleksander FRĘCHOWICZ  
Politechnika Śląska, Gliwice

## O MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA NAPĘDÓW HYBRYDOWYCH W PODZIEMIACH KOPALŃ MIEDZI

**Streszczenie.** W podziemiach kopalń miedzi do odstawy urobku stosuje się platformy samojezdne napędzane wysokoprężnym silnikiem spalinowym. Taka platforma, szczególnie podczas manewrowania, wytwarza duże ilości spalin, które są bardzo uciążliwe dla pracujących tam górników. Ilość spalin można poważnie ograniczyć stosując hybrydowy napęd platformy, składający się ze silnika spalinowego i silnika elektrycznego. W artykule przedstawiono koncepcję takiego układu.

## USABILITY OF HYBRID DRIVES IN UNDERGROUND COPPER MINES

**Summary.** In the underground copper mines self-propelled platforms driven by diesel engine are used for output haulage. Such platforms generate a lot of exhaust gases (especially during manouvers), that are very inconvenient for nearby workers. The amount of exhaust gases can be seriously reduced by using hybrid drive consisting of diesel engine and electric engine. The conception of such a system has been presented in this paper.

### 1. Wprowadzenie

W podziemiach kopalń miedzi do odstawy urobku stosuje się platformy samojezdne napędzane wysokoprężnym silnikiem spalinowym. Taka platforma, szczególnie podczas manewrowania, wytwarza duże ilości spalin, które, mimo pracującej poprawnie wentylacji, są bardzo uciążliwe dla pracujących tam górników. Analiza tego zjawiska, prowadzona w zespole naukowym składającym się z pracowników Instytutu Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej oraz Katedry Elektryfikacji i Automatykacji Górnictwa Politechniki Śląskiej, doprowadziła do powstania koncepcji zastosowania do napędu platformy zespołu hybrydowego: silnik spalinowy–silnik elektryczny. Napędzający platformę silnik spalinowy

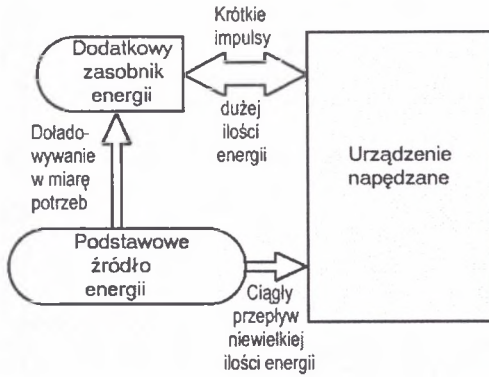
pracowałby na stałych, wolnych obrotach, wydzielając niewielkie ilości spalin. Podczas pracy ustalonej nadwyżka mocy silnika spalinowego napędzałaby dodatkowo prądnicę. Energia z prądnicy byłaby magazynowana w dodatkowym zasobniku energii. Również energia powstająca podczas hamowania platformy, byłaby przejmowana przez prądnicę i magazynowana w tym zasobniku. Natomiast podczas przyspieszania, prądnica elektryczna przechodziłaby do pracy silnikowej i, zasilana z dodatkowego zasobnika energii, wspomagałaby swoim momentem silnik spalinowy. Istnieje duże prawdopodobieństwo, że w takim układzie emisja spalin zostanie mocno ograniczona.

## 2. Dodatkowe zasobniki energii

Pomysł stosowania dodatkowych zasobników energii zrodził się w ostatnich latach wraz z poszukiwaniem rozwiązań zmniejszających energochłonność napędów spalinowych. Rosnące w ostatnich latach lawinowo koszty paliw zmusiły konstruktorów do podwyższenia sprawności stosowanych układów napędowych. Poszukując źródeł oszczędności zwrócono uwagę na spore straty energii, występujące podczas hamowania prawie wszystkich napędów. Układ magazynujący energię traconą podczas hamowania, a następnie umożliwiający ponowne wykorzystanie tej energii podczas rozpędzania napędu, stał się w latach drogiej energii bardzo pożądanym składnikiem nowych konstrukcji. Zastosowanie takiego układu wymagało jednak znalezienia odpowiednich urządzeń i elementów zdolnych do przechwycenia i przechowania zbędnej energii. Najczęściej energia powstająca podczas hamowania jest przekształcana na energię elektryczną w generatorze, przechowywana w dodatkowym zasobniku energii i zwracana za pomocą silnika elektrycznego. Często generator i silnik to ta sama maszyna. Typowy układ obiegu energii pokazano na rys. 1.

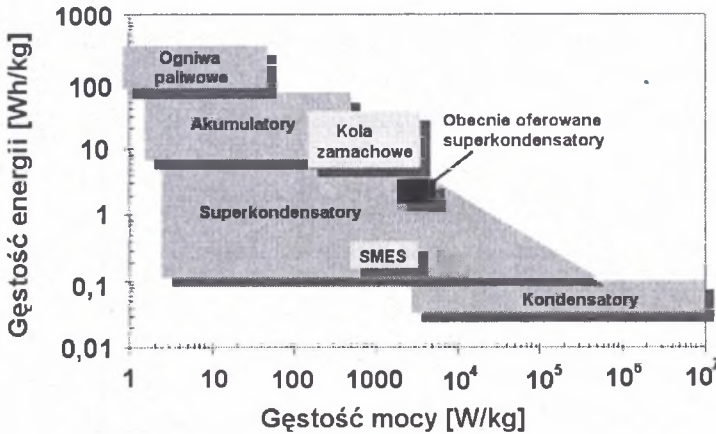
W ostatnich latach testowano i wdrażano wiele różnych układów zasobników energii. Były to klasyczne kondensatory elektrolityczne, akumulatory, ogniwa paliwowe, układy SMES (układy magazynujące energię w nadprzewodnikach – *Superconducting Magnetic Energy Storage*), układy kół zamachowych i superkondensatory.

Głównymi parametrami cechującymi zasobniki energii są: gęstość mocy mierzona w W/kg urządzenia i gęstość energii mierzona w Wh/kg urządzenia. Te dwa parametry pozwalają zorientować się jak wielkie i ciężkie musi być urządzenie służące do magazynowania energii, w zależności od ilości magazynowanej energii i od szybkości, z jaką ta energia może być przez urządzenie pobierana i oddawana.



Rys. 1. Obieg energii w układzie z dodatkowym zasobnikiem energii  
 Fig. 1. Energy cycle in a system with additional energy accumulator

Niektóre urządzenia są w stanie magazynować dużą ilość energii, ale czas ładowania i rozładowania musi być długi, inne urządzenia pozwalają na szybkie ładowanie i rozładowanie, ale ilość magazynowanej energii nie jest zbyt duża. Aby można było łatwo zorientować się o możliwościach danego zasobnika energii, stworzono tzw. wykres Ragone'a (rys. 2). Położenie układu wzdłuż osi odciętych mówi o możliwościach układu do szybkiego przekazywania energii; położenie wzdłuż osi rzędnych mówi o tym, jak wielką ilość energii można zgromadzić w układzie.



Rys. 2. Wykres Ragone'a stosowanych obecnie dodatkowych zasobników energii (SMES - układy magazynujące energię w nadprzewodnikach)  
 Fig. 2. Ragone diagram for different additional energy accumulators (SMES - Superconducting Magnetic Energy Storage device)

Oczywiście idealny element magazynujący energię powinien znaleźć się w górnym, prawym rogu wykresu. Niestety, takich urządzeń jeszcze nie wynaleziono. Jeśli dodatkowo pamiętać o tym, że tak układy kół zamachowych, jak i układy SMES są jeszcze w trakcie rozwoju i dlatego są drogie i mniej pewne niż inne rozwiązania, praktycznie najlepszym elementem pozwalającym na magazynowanie i wydawanie energii są superkondensatory lub kombinacja superkondensatorów i akumulatorów.

### 3. Superkondensatory jako dodatkowy zasobnik energii

Superkondensatory to wdrażane ostatnio kondensatory o bardzo dużej pojemności. Początkowo elementy te były stosowane do podtrzymania zasilania pamięci urządzeń cyfrowych, później zaczęto je stosować w przenośnych komputerach i telefonach. Obecnie zaczyna się stosować superkondensatory w układach elektromaszynowych.

Zasada działania superkondensatorów jest taka sama, jak innych kondensatorów. Ich pojemność jest wprost proporcjonalna do powierzchni elektrod i odwrotnie proporcjonalna do odległości między elektrodami. W superkondensatorach wielokrotnie zwiększono powierzchnię okładek, budując je w postaci włókien z aktywnego węgla zanurzonych w elektrolicie – wodorotlenku potasu. Pojemność superkondensatora dochodzi do kilku tysięcy faradów.

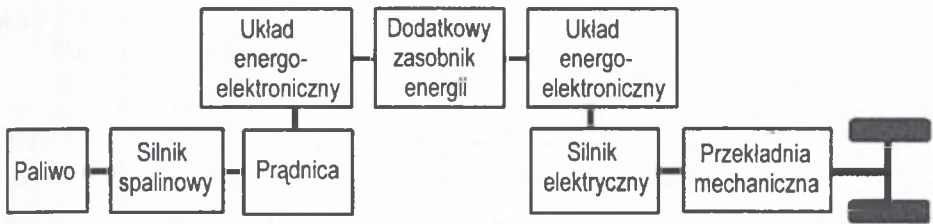
Wadą superkondensatorów jest niskie napięcie, jakie można przyłożyć do ich okładek. Maksymalne napięcie dekompozycji stosowanego elektrolitu wynosi 3 V, i dlatego produkowane superkondensatory są znamionowane na zaledwie 2,5 V. W zastosowaniach elektromaszynowych takie napięcie jest zbyt małe i dlatego superkondensatory łączy się szeregowo w moduły. Firmy produkujące superkondensatory najczęściej oprócz prostych elementów oferują również zestawy modułowe. Dzisiaj są dostępne standardowe moduły o napięciach do 42 V. Moduły są wyposażane w układ aktywnych dzielników, którego zadaniem jest wyrównanie napięć na poszczególnych kondensatorach.

Superkondensatory stosowano już w pojazdach hybrydowych jako dodatkowy zasobnik energii, przeznaczony do wydawania krótkotrwałych impulsów energii podczas przyspieszania (energia gromadzona jest wcześniej podczas hamowania lub pracy ustalonej). W samochodach z silnikiem diesla redukcja zużycia paliwa w jeździe miejskiej jest szacowana na więcej niż 50 %. Ponadto, co jest bardzo interesujące w rozpatrywanym przez nas przypadku, superkondensatory pozwalają zredukować emisję niektórych zanieczyszczeń nawet o 90 %; w tym tlenku azotu o 50 %.

#### 4. Topologie napędów hybrydowych spalinowo-elektrycznych

Głównymi składnikami napędu hybrydowego pojazdu są silnik spalinowy i jedna lub dwie maszyny elektryczne. Ponadto, w układzie stosuje się jednostopniowe przekładnie mechaniczne, skrzynie biegów, sprzęgła itp. Istnieje wiele sposobów połączenia tych elementów, a zatem wielka liczba możliwych topologii układu hybrydowego. Najczęściej jednak wszystkie możliwe topologie dzieli się na dwie grupy: szeregowę i równoległą.

W topologii szeregowej cała energia mechaniczna wytworzona przez silnik spalinowy jest przetwarzana (w prądnicie elektrycznej) na energię elektryczną. Przy małym zapotrzebowaniu na moc, część energii elektrycznej jest magazynowana w dodatkowym zasobniku energii, a pozostała część jest ponownie przekształcana na energię mechaniczną (w silniku elektrycznym) i napędza pojazd. Przy dużym zapotrzebowaniu na moc, na energię mechaniczną przekształcana jest nie tylko cała energii elektryczna uzyskana w prądnicie, ale również część energii zgromadzonej w dodatkowym zasobniku energii. W klasycznej topologii szeregowej istnieje również możliwość czystej pracy elektrycznej (przy wyłączonym silniku spalinowym), nie można natomiast zrealizować pracy czysto mechanicznej (przy wyłączonych maszynach elektrycznych). Schemat blokowy napędu hybrydowego o topologii szeregowej pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Topologia szeregowa napędu pojazdu hybrydowego  
 Fig. 3. Serial topology of hybrid vehicle drive

W topologii równoległej układu hybrydowego (rys. 4) tylko część energii mechanicznej wytworzonej przez silnik spalinowy jest zamieniana na energię elektryczną i przesyłana do dodatkowego zasobnika energii, natomiast reszta energii jest przekazywana mechanicznie na koła pojazdu (silnik spalinowy jest mechanicznie połączony z kołami przez skrzynię biegów i przekładnię). Tylko mała część energii jest przetwarzana i dlatego układ równoległy ma wyższą sprawność niż szeregowy układ hybrydowy. Inną zaletą układu równoległego jest fakt, że układ ten można zrealizować za pomocą jednej maszyny elektrycznej, pracującej przemiennie jako prądnicą lub silnik.



Rys. 4. Topologia równoległa napędu pojazdu hybrydowego  
 Fig. 4. Parallel topology of hybrid vehicle drive

Podobnie jak w topologii szeregowej, tak i w równoległej układ może się znajdować:

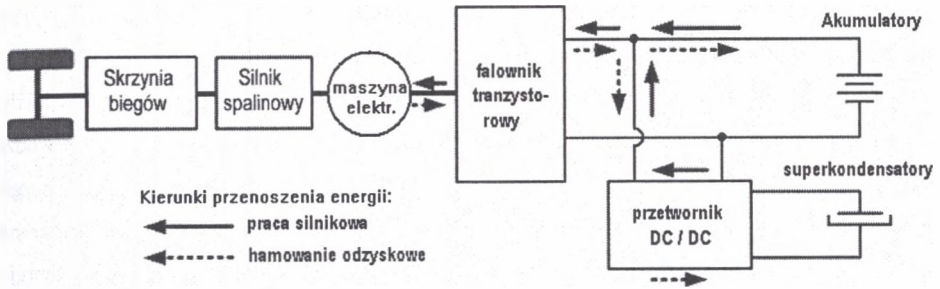
- w trybie pracy elektrycznej (przy zasilaniu silnika elektrycznego z zasobnika energii), przy czym silnik benzynowy powinien być odłączony przez sprzęgło),
- w trybie pracy mechanicznej, podczas której silnik spalinowy dodatkowo ładuje akumulatory,
- w trybie pracy z obu źródeł energii (paliwo i zasobnik); w tym trybie układ osiąga maksymalną moc; czysta praca silnika benzynowego.

Ponadto, w topologii równoległej układ hybrydowy może pracować w trybie czystej pracy mechanicznej, przy odłączonych wszystkich obwodach elektrycznych, co poprawia niezawodność napędu.

## 5. Koncepcja zastosowania napędu hybrydowego w podziemiach kopalń

Jak już wspomniano, nasze zainteresowanie wzbudziła możliwość zastosowania napędu z superkondensatorami w platformie samojezdnej eksploatowanej w podziemiach kopalń miedzi. Głównym celem konstrukcji nie była oszczędność paliwa, ale zmniejszenie ilości spalin wysyłanych przez wysokoprężny silnik platformy. Zakłada się, że spalinowy silnik platformy powinien pracować na stałych, wolnych obrotach, wydzielając niewielkie ilości spalin. Podczas pracy ustalonej i hamowania, nadwyżka mocy napędzałaby prądnicę i ładowała kondensatory. Podczas przyspieszania, prądnica elektryczna przechodziłaby do pracy silnikowej i, zasilana z superkondensatorów, wspomagałaby swoim momentem silnik spalinowy. Istnieje duże prawdopodobieństwo, że emisja spalin zostanie mocno ograniczona. Proponowaną topologię układu napędowego pokazano na rys. 5.

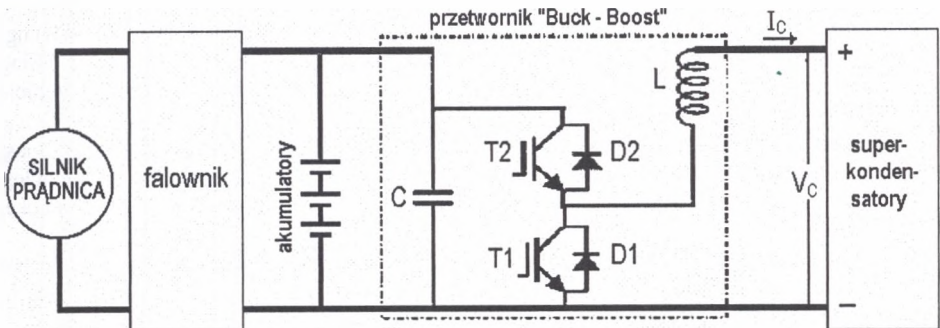
Przetwornik DC/DC powinien być przetwornikiem dwukierunkowym, umożliwiającym sterowanie kierunkiem przepływu energii: z baterii do kondensatorów lub na odwrót.



Rys. 5. Proponowana topologia napędu hybrydowego platformy  
 Fig. 5. Suggested topology of hybrid drive of a platform

Założono, że napięcie na baterii będzie wyższe niż napięcie na kondensatorach. Przetwornik powinien pracować w dwóch trybach „boost” i „buck”. W trybie „boost” przetwornik pracuje jako falownik i przenosi energię ze źródła o niższym napięciu (z kondensatorów) do źródła o wyższym napięciu (do baterii). W trybie „buck” przetwornik DC/DC pracuje jako układ regeneracji energii przychodzącej do banku superkondensatorów. W tym trybie układ przenosi energię ze źródła o wyższym napięciu (z baterii) do źródła o niższym napięciu (do kondensatorów).

Istnieje wiele układów elektronicznych przetwornika realizującego dwukierunkowy przetwornik DC/DC. Najczęściej stosuje się układ: „single-stage buck/boost” lub układ „pełny mostek”. W naszej pracy przyjęliśmy koncepcję układu „single-stage buck/boost”, pokazaną na rys. 6.



Rys. 6. Dwukierunkowy przetwornik DC/DC wykonany w topologii „single-stage buck/boost”  
 Fig. 6. Bidirectional DC/DC converter with a „single-stage buck/boost” topology

Proponowany układ składa się z dwukierunkowego przetwornika DC-DC bazującego na tranzystorach IGBT i dławika wygładzającego. Zakłada się, że podczas przyspieszania, kondensatory mogą rozładować się od napięcia które pozwala odzyskać 2/3 zgromadzonej w nich energii użytecznej. Podczas hamowania, energia jest odzyskiwana w podobny sposób.

Przetwornik DC-DC pracuje w dwóch trybach: w trybie „Boost”, który jest wykorzystywany dla przyspieszania pojazdu, kiedy superkondensatory rozładowują się; i w trybie „Buck” wykorzystywanym przy hamowaniu pojazdu ze zwrotem energii), kiedy superkondensatory są ładowane. Podczas trybu „Boost” (przyspieszanie), przewodzi tranzystor T1 (sterowany falą PWM), aby przekazywać wymaganą ilość energii z kondensatorów do baterii akumulatorów. Kiedy T1 przewodzi, energia jest pobierana z kondensatorów i jest magazynowana w dławiku L. Kiedy T1 przestaje przewodzić, energia zmagazynowana w dławiku L jest przesyłana przez diodę D2 do kondensatora C, a następnie do baterii akumulatorów. Podczas pracy w trybie „Buck”, przetwornik wprowadza energię z akumulatora do superkondensatorów. To działanie jest związane ze sterowaniem tranzystora T2. Kiedy T2 przewodzi, energia jest przenoszona z baterii akumulatorów do superkondensatorów, a część tej energii zostaje zmagazynowana w dławiku L. Kiedy T2 przestaje przewodzić, reszta energii zmagazynowanej w dławiku LS jest przesyłana do superkondensatorów przez diodę D1.

## LITERATURA

1. Yoon Sung-Geun, Lee Jae-Moon, Park Jong-Hu, Lee In-Kyu, Cho B. H.: A Frequency Controlled Bi-directional Synchronous Rectifier Converter for HEV Using Super-Capacitor. 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference Aachen, Germany, 2004.
2. Jeong Jin-uk, Lee Hyeoun-dong, Kim Chul-soo, Choi Hang-Seok, Cho Bo-Hyung: A Development of an Energy Storage System for Hybrid Electric Vehicles Using Supercapacitor The 19th International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition, pp.1379-1389, Oct 2002.
3. Ortúzar M., Dixon J., Moreno J.: Design, Construction and Performance of a Buck-Boost Converter for an Ultracapacitor-Based Auxiliary Energy System for Electric Vehicles, IEEE Industrial Electronics Conference, IECON2003, November 2-6, 2003, Roanoke, Virginia, USA.
4. Dixon J., Ortúzar M. Moreno J.: DSP Based Ultracapacitor System for Hybrid-Electric Vehicles, 20th Electric Vehicle Symposium, November 15-19, 2003, Long Beach, California, USA.
5. Schneuwly A., Bärtschi M., Hermann V., Sartorelli G., Gallay R., Koetz R.: BOOSTCAP Double-Layer Capacitors for Peak Power Automotive Applications, z internetu: <http://www.maxwell.com/ultracapacitors/support/overview.html>