

Wpływ rekuperacji energii na poprawę sprawności układu zasilająco-sterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej

Streszczenie

W artykule przedstawiono zagadnienie rekuperacji energii w górniczych lokomotywach akumulatorowych. Omówiono badania symulacyjne układu zasilająco-sterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej typu Lea BM-12. Zaprezentowano wyniki badań zużycia energii elektrycznej lokomotywy Lea BM-12 w czasie zmiany eksploatacyjnej w kopalni, które odniesiono do wyników symulacji. Wskazano czynniki wpływające na skuteczność odzysku energii.

Słowa kluczowe: lokomotywa akumulatorowa, układ zasilająco-sterujący, rekuperacja energii, sprawność energetyczna lokomotywy, badania symulacyjne

Keywords: battery locomotive, supply-and-control system, energy recuperation, efficiency of locomotive energy conversion, simulation tests

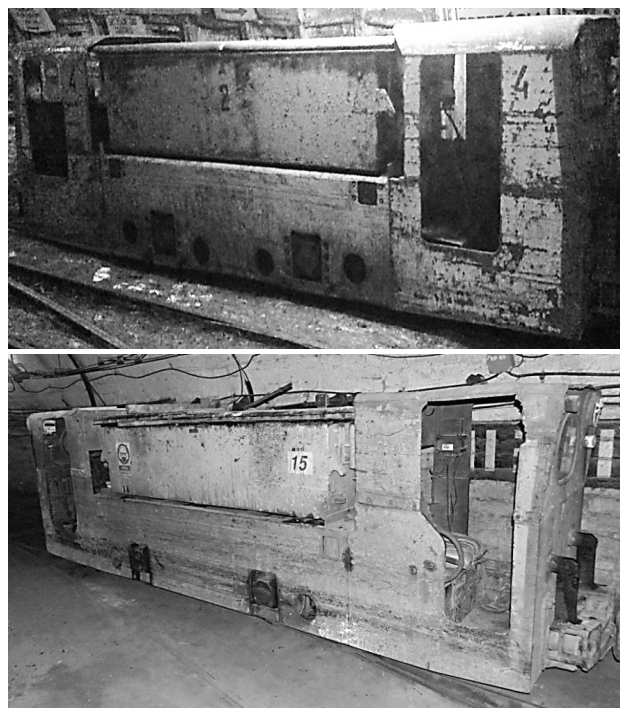
Summary

The problem of energy recuperation in mine battery locomotive is presented. Simulation tests of supply-and-control system in Lea BM-12 mine battery locomotive is discussed. Results of testing the energy consumption of Lea BM-12 mine battery locomotive during one operational shift are compared with the simulation test results. The factors, which have impact on efficiency of energy recovery, are indicated.

1. Wstęp

Przewóz ludzi w podziemnych wyrobiskach górniczych oraz transport materiałów i urobku w kopalniach jest jednym z najważniejszych procesów wpływających na efektywność produkcji surowca. Jako środki transportu stosuje się m.in. lokomotywy spągowe oraz ciągniki podwieszane [5]. Ze względu na sposób zasilania, wyróżnia się trzy rodzaje lokomotyw spągowych: spalinowe, trakcyjne i akumulatorowe.

Z uwagi na emisję szkodliwych substancji pochodzących z lokomotyw spalinowych dąży się do ich ograniczenia i zastąpienia napędami elektrycznymi. W najgłębszych pokładach kopalń, podczas drażenia wyrobisk chodnikowych praktycznie nie wykorzystuje się napędów spalinowych. Wydobycie urobku oraz transport materiałów realizowany jest za pomocą systemów transportowych zasilanych elektrycznie [5]. Stosowane lokomotywy akumulatorowe dorównują mobilnością lokomotywowi spalinowemu, przewyższając je przy tym sprawnością i niższą emisją szkodliwych gazów. Wyższa sprawność energetyczna lokomotyw akumulatorowych wpływa dodatkowo na ograniczenie emisji ciepła do atmosfery kopalnianej [1]. Lokomotywy trakcyjne ustępują maszynom akumulatorowym, głównie z powodu ograniczeń wynikających z możliwości prowadzenia trakcji elektrycznej w wybranych rejonach kopalni. Najbardziej popularną, eksploatowaną maszyną akumulatorową w polskim górnictwie węgla kamiennego jest lokomotywa Lea (odmiana BM-12 lub 12P3) – rysunek 1, pracująca już od blisko pięćdziesięciu lat.



Rys.1. Górnicza lokomotywa akumulatorowa typu Lea BM-12 oraz Lea 12P3 [6]

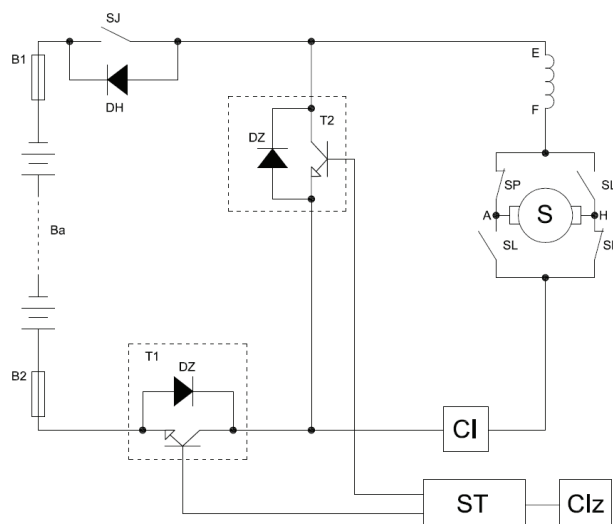
Lokomotywa ta napędzana jest silnikiem szeregowym prądu stałego typu LDs-245 (Lea BM-12) lub LDs-327 (Lea 12P3). Silniki, z uwagi na zainstalowaną moc elektryczną, mają różną prędkość obrotową (LDs-245 $n_N = 2910$ obr/min, silnik LDs-327 $n_N = 1450$ obr/min.). W pierwszych rozwiązaniach, w układzie napędu lokomotywy akumulatorowej, do sterowania rozruchem oraz do regulacji prędkości silników trakcyjnych były stosowane rezystory [4].

Regulacja prędkości maszyny polegała na dołączaniu szeregowych rezystorów rozruchowych oraz przełączaniu silników trakcyjnych, z połączenia szeregowego na równoległe. Układy te posiadały szereg wad, takich jak: trudność regulacji prędkości kątowej silników, duże straty mocy na rezystorach rozruchowych oraz konieczność stosowania dużej liczby styczników i nastawników przełączających prąd o dużym natężeniu, co powodowało szybkie zużywanie się elementów stykowych. Największą wadą tego typu układu sterowania był jednak brak możliwości zwrotu energii do baterii w procesie hamowania elektrycznego. Cała energia odzyskiwana podczas hamowania odprowadzana była w postaci ciepła. Wady pierwotnych układów sterowania decydowały o niskiej sprawności układu napędowego lokomotywy. Projektanci i producenci lokomotyw dążyli zatem do opracowania rozwiązania układu napędowego o wyższej sprawności.

2. Rekuperacja energii w górniczych lokomotywach akumulatorowych

Rekuperacja energii polega na jej odzyskiwaniu w celu dalszego wykorzystania. W maszynach z napędem elektrycznym lub hybrydowym, rekuperacja jest realizowana poprzez wykorzystanie silnika elektrycznego jako prądnicy, do konwersji energii ruchu obrotowego na energię elektryczną. Silnik przekształca energię kinetyczną rozpędzonej masy pojazdu na energię elektryczną, w trakcie hamowania elektrycznego, umożliwiając w ten sposób odzysk energii, która może być oddawana bezpośrednio do sieci trakcyjnej lub gromadzona w baterii akumulatorów [3]. Możliwość rekuperacji energii w górniczych lokomotywach akumulatorowych zaistniała w latach 90-tych ubiegłego wieku. Istotną rolę w unowocześnieniu, usprawnieniu i poprawieniu własności trakcyjnych tych maszyn odegrał Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, który opracował i wykonał zespoły przekształtnikowe, wyposażone w łączniki okresowe prądu stałego (początkowo tyrystorowe, obecnie tranzystorowe) i układy regulacji przeznaczone do rozruchu, zmian prędkości i hamowania elektrycznego górniczych lokomotyw akumulatorowych, o mocach silników od 12 do 90 kW [7]. Uproszczony schemat tranzystorowego łącznika prądu stałego do sterowania napędem lokomotywy akumulatorowej lub trakcyjnej pokazano na rysunku 2.

Sprawność energetyczna lokomotywy wyposażonych w tego typu układ sterowania, w stosunku do rezystorowych układów sterujących, jest wyższa o ok. 25 %. Ponadto, w wyniku kontrolowanego przepływu prądu w napędach trakcyjnych, wydłużyła się żywotność silników i przekładni mechanicznych lokomotyw.



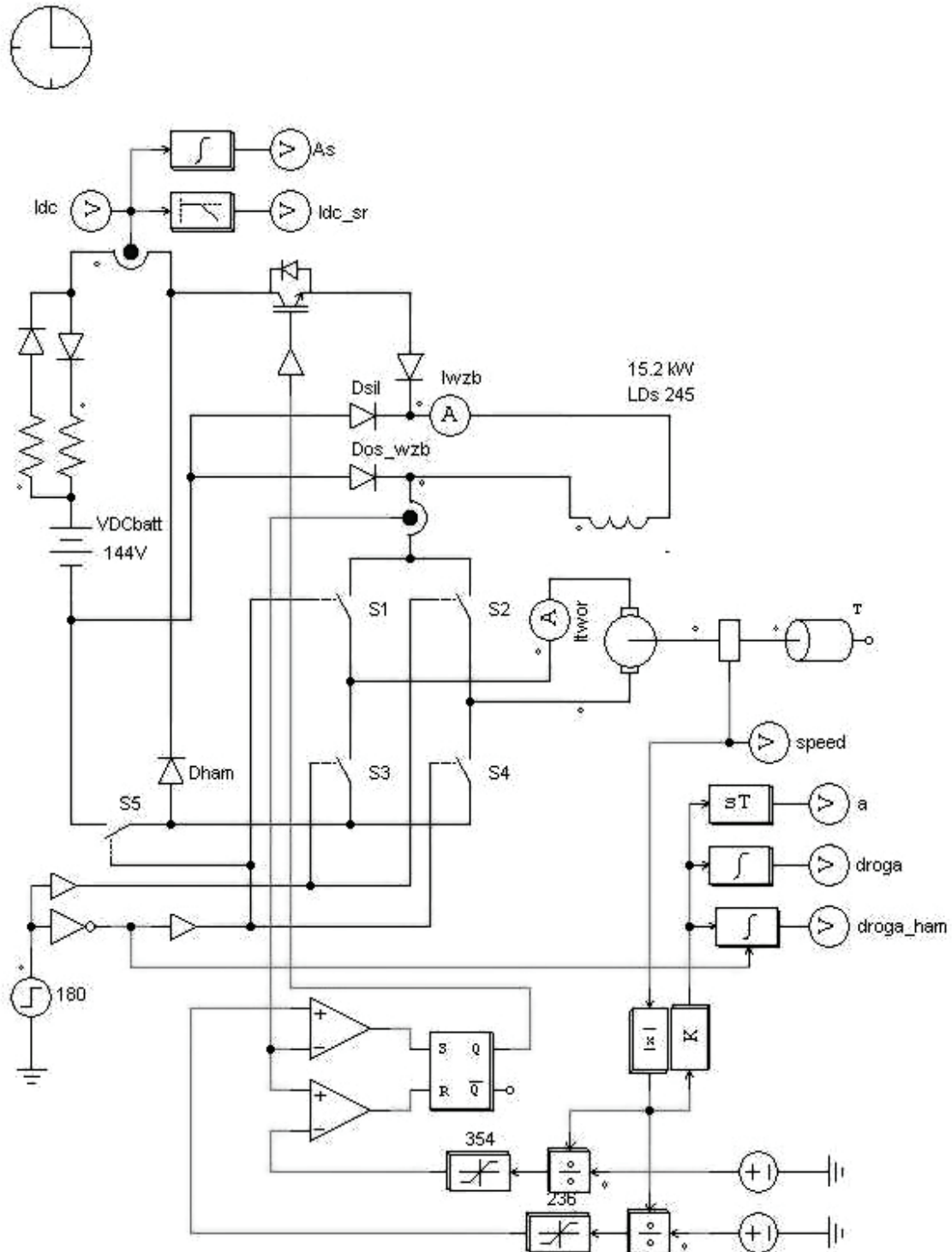
Rys.2. Uproszczony schemat tranzystorowego łącznika prądu stałego [7] *T1* – łącznik okresowy do jazdy lokomotywy, *T2* – łącznik okresowy do hamowania lokomotywy, *CIz* – człon zadawania prądu, *SJ* – łącznik jazdy, *SP, SL* – łączniki do rewersji prądu w obwodzie twornika, *DZ* – dioda zwrotna, *DH* – dioda hamowania, *CI* – czujnik prądu, *ST* – sterownik elektroniczny.

3. Badania symulacyjne układu zasilająco-sterującego lokomotywy górniczej z rekuperacją energii

Badania symulacyjne układu zasilająco-sterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej, przeznaczonego do odzysku energii elektrycznej, prowadzono w środowisku symulacyjnym PSIM. Zakres symulacji, obejmował przejazd lokomotywy od remizy w kierunku punktu załadunkowego (jazda po wzniosie bez załadunku), a następnie przejazd od punktu załadunkowego do miejsca wyładunku (jazda po upadzie z załadunkiem). Zasymulowano rozpędzanie lokomotywy, jazdę na wybiegu oraz hamowanie z odzyskiem energii. Model układu zasilająco-sterującego lokomotywy Lea Bm-12 pokazano na rysunku 3.

W badaniach uwzględniano profil trasy transportowej zidentyfikowany wcześniej w jednej z kopalń jako rzeczywisty, po której poruszają się górnicze lokomotywy akumulatorowe. Wybrano trasę o niekorzystnych parametrach trakcyjnych. Długość trasy wynosiła ok. 3000 m (od punktu załadunku do punktu wyładunku), a średnie nachylenie 0,4% (w kierunku stacji wyładkowej). Do badań symulacyjnych założono następujące parametry lokomotywy akumulatorowej:

- maksymalna siła pociągowa $F_{pmax} = 30$ kN,
- prędkość maksymalna $V_{max} = 6$ m/s,
- przełożenie przekładni $z = 1:19,26$,
- średnica kół $d = 560$ mm,
- znamionowe napięcie akumulatorów $U_n = 144$ V,
- pojemność pięciogodzinna akumulatorów $C_5 = 840$ Ah.



Rys.3. Model symulacyjny układu zasilająco-sterującego lokomotywy Lea BM-12, napędzanej silnikiem prądu stałego typu LDs-245 [2]

3.1. Symulacja rozpędzania i hamowania zestawu transportowego o masie 57,5 ton, jadącego po wzniosie o nachyleniu 0,4% (jazda w kierunku punktu załadowniczego)

Symulacja polegała na rozpędzaniu zestawu transportowego (bez załadunku), po wzniosie o nachyleniu 0,4%, w zakresie prędkości 0 - 2,7 m/s. Po osiągnięciu prędkości ustalonej następowało

hamowanie, aż do zatrzymania lokomotywy. Podczas symulacji rejestrowano następujące parametry:

- prędkość lokomotywy,
- moment elektromagnetyczny silnika,
- prąd twornika silnika,
- średni prąd baterii akumulatorów,
- energię pobraną oraz oddaną do baterii akumulatorów.

Na podstawie rejestrowanych wartości parametrów, wyliczono moc mechaniczną na wale silnika. Wyniki symulacji przedstawiono w tabeli 1.

Wyniki symulacji jazdy lokomotywy w kierunku punktu załadunku [2]

Tabela 1

Silnik szeregowy prądu stałego 15 kW typu LDs-245	
Jazda po wzniosie o nachyleniu 0,4% bez załadunku	
moc mechaniczna na wale silnika	25,5 kW
przebyta droga	117 m
prędkość ustalona	2,7 m/s (1797 obr/min)
maks. prąd pobrany z baterii	186 A
energia pobrana z baterii	386 Wh
energia oddana do baterii	48 Wh
droga hamowania	8,2 m

3.2. Symulacja rozpędzania i hamowania zestawu transportowego o masie 137,5 ton, jadącego po upadzie o nachyleniu 0,4% (z załadunkiem)

Symulacja polegała na rozpędzaniu zestawu transportowego (z załadunkiem), po upadzie o nachyleniu 0,4%, w zakresie prędkości 0 - 3,2 m/s. Po osiągnięciu prędkości ustalonej następowało hamowanie, aż do zatrzymania lokomotywy. Podczas symulacji rejestrowano następujące parametry:

- prędkość lokomotywy,
- moment elektromagnetyczny silnika,
- prąd twornika silnika,
- średni prąd baterii akumulatorów,
- energię pobraną oraz oddaną do baterii akumulatorów.

Na podstawie rejestrowanych parametrów, wyliczono moc mechaniczną na wale silnika. Wyniki symulacji przedstawiono w tabeli 2.

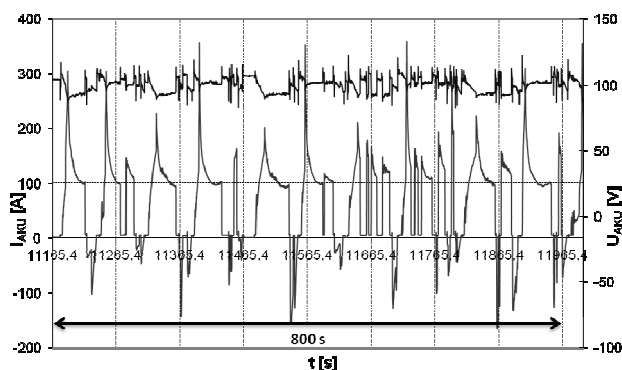
Wyniki symulacji jazdy lokomotywy w kierunku punktu wyładunku [2]

Tabela 2

Silnik szeregowy prądu stałego 15 kW typu LDs-245	
Jazda po upadzie o nachyleniu 0,4% z załadunkiem	
moc mechaniczna na wale silnika	21,9 kW
przebyta droga	516 m
prędkość ustalona	3,235 m/s (2125 obr/min)
max. prąd pobrany z baterii	159 A
energia pobrana z baterii	1224 Wh
energia oddana do baterii	168 Wh
droga hamowania	33,6 m

W badaniach symulacyjnych, analizowano tylko dwa odcinki trasy, w których następuje hamowanie elektryczne z odzyskiem energii. Profil trasy oraz obciążenie lokomotywy akumulatorowej były

niekorzystne dla danej maszyny, które w odniesieniu do informacji uzyskanych z kopalni zdarzają się bardzo rzadko. Pomimo tego, odzyskano energię o wartości 168 Wh. W typowych warunkach pracy, lokomotywa akumulatorowa porusza się z mniejszymi obciążeniami, przejeżdżając po łagodniejszych odcinkach tras transportowych, na których hamowanie elektryczne z odzyskiem energii odbywa się znacznie częściej.



Rys.4. Przykładowe przebiegi napięcia i natężenia prądu baterii, podczas pracy górniczej lokomotywy akumulatorowej typu Lea BM-12 [6]

Na rysunku 4 zaprezentowano przykładowe przebiegi napięcia oraz natężenia prądu baterii akumulatorów zarejestrowane podczas rzeczywistej pracy górniczej lokomotywy akumulatorowej typu Lea BM-12. W ciągu 800 sekund pracy lokomotywy transportującej kilkanaście ton materiału zarejestrowano hamowanie elektryczne z odzyskiem energii. W czasie hamowania, średnia wartość skuteczna natężenia prądu płynącego do baterii wynosiła 100 A. Przebieg natężenia prądu baterii miał charakter cykliczny. Każdy z cykli podzielono na trzy etapy: rozpędzanie, jazda na wybiegu oraz hamowanie elektryczne z odzyskiem energii. Bezpośrednie przejście rozpędzonej maszyny w tryb hamowania elektrycznego z odzyskiem energii, z uwagi na wygenerowanie prądu o natężeniu ok. 400 A, może wpływać niekorzystnie na układ energoelektroniczny. Sytuacja taka podczas normalnej pracy maszyny jednak z reguły nie występuje. Wyjątek stanowi hamowanie awaryjne. Obecnie układy zasilająco-sterujące nie są wyposażone w system ograniczający prąd płynący do baterii w czasie hamowania elektrycznego. Gwałtowne przekazanie do baterii akumulatorów prądu o dużym natężeniu może powodować intensywną emisję gazu elektrolitycznego – wodoru, który w pewnych stężeniach może stać się gazem wybuchowym. Konstrukcja skrzyń przeciwwybuchowych umożliwia jednak przewietrzanie zgromadzonego wodoru. Częste pomijanie etapu jazdy na wybiegu i gwałtowne przechodzenie w hamowanie elektryczne z odzyskiem energii, może powodować nagromadzenie dużej ilości wodoru i wymagać skutecznego przewietrzania skrzyni baterii akumulatorów. W celu niedopuszczenia do nagromadzenia wybuchowego stężenia wodoru we

wnętrzu skrzyni baterii akumulatorów, proponuje się podjąć następujące działania:

- poprawić przewietrzanie skrzyni baterii akumulatorów, co wiąże się z koniecznością przeprowadzenia badań w zakresie uzyskania certyfikatu ATEX,
- zmodyfikować układ zasilająco-sterujący lokomotywy, dążąc do minimalizacji emisji gazu elektrolitycznego, przy zachowaniu maksymalnej sprawności układu oraz wymaganych parametrów bezpieczeństwa pracy.

Zmiany w układzie sterowania nie wymagają przeprowadzenia ponownych badań, tak jak w przypadku modyfikacji układu przewietrzania skrzyni baterii akumulatorów. Z punktu widzenia efektywności, niezawodności i uniwersalności, rozwiązanie takie wydaje się być najkorzystniejsze.

4. Podsumowanie

Przeprowadzone analizy oraz symulacje komputerowe układu zasilająco-sterującego z zastosowaniem nowoczesnych układów energoelektronicznych w znacznym stopniu poprawiło sprawność energetyczną lokomotywy akumulatorowej. Sprawność można docelowo dodatkowo zwiększyć poprzez odzysk energii w procesie hamowania elektrycznego. Ilość odzyskanej energii zależy od wielu czynników, takich jak:

- obciążenie lokomotywy,
- sprawność układu energoelektronicznego,
- sprawność silnika napędowego,
- sprawność baterii akumulatorów,
- parametry trasy transportowej.

Sprawność stosowanych aktualnie silników prądu stałego wynosi ok. 85%, przy założeniu, że są to nowe maszyny. Uwzględniając sprawność pozostałego układu energoelektronicznego na poziomie 90%, sumaryczna sprawność energetyczna maszyny może wynieść ok. 70%. W celu poprawy tego stanu poddaje się modyfikacji układ sterowania, poprzez zastosowanie nowoczesnych falowników o wysokiej sprawności. Rozwój silników napędowych umożliwia dodatkowo zastosowanie w napędach górniczych lokomotyw akumulatorowych bezszczotkowych silników synchronicznych z magnesami trwałymi, których

sprawność wynosi ponad 92%. Obecnie trwają prace nad wdrożeniem lokomotywy akumulatorowej, wyposażonej w nowoczesny układ zasilająco-sterujący z odzyskiem energii elektrycznej. Wdrożona górnicza lokomotywa akumulatorowa typu Lda-12K-EMA będzie wynikiem projektu celowego realizowanego przez firmę Energomechanik przy współudziale z Instytutem Techniki Górniczej Komag.

Literatura

1. Budzyński Z., Polnik B.: Mechatroniczny układ sterowania i napędu akumulatorowych kolei szynowych przeznaczonych do pracy w atmosferze wybuchowej. *Maszyny Górnicze* 2011 nr 2, s. 45-51.
2. Dokumentacja, wykonana w ramach projektu badawczego rozwojowego pt. „Mechatroniczny układ napędowy do pojazdów szynowych przeznaczonych do pracy w atmosferze wybuchowej”. ITG KOMAG (materiały nie publikowane).
3. Pawełczyk M.: Rozwój systemów wykorzystujących akumulację energii w transporcie szynowym. *Pojazdy Szynowe* 2012 nr 2, s. 14-19.
4. Pawlaczyk L.: Przekształtniki energoelektroniczne w zastosowaniach przemysłowych. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej* 2005 Nr 58, s. 1-24.
5. Polnik B.: Silnik PMSM jako nowoczesny napęd w górniczych systemach transportowych. *Maszyny Elektryczne – Zeszyty problemowe* 2012 nr 1, s. 81-86.
6. Polnik B.: Badania i analiza pracy układu zasilająco-sterującego górniczej lokomotywy akumulatorowej”. ITG KOMAG, Gliwice 2014 (materiały nie publikowane).
7. Szczucki F.: Rozwój energooszczędnych urządzeń i napędów maszyn górniczych oraz systemów transportowych. *Wiadomości Elektrotechniczne* 2006 nr 1, s. 3-9.

Artykuł wpłynął do redakcji w czerwcu 2014 r.