

Bilans energetyczny hybrydowego układu napędowego lokomotywy górniczej

Rafał Konsek, Arkadiusz Mężyk

1. Wprowadzenie

Podstawowym celem coraz szerszego stosowania napędów hybrydowych jest obniżenie zużycia paliwa oraz ograniczenie emisji substancji toksycznych do środowiska. Efektywny sposób wykorzystania hybrydowego układu napędowego wymaga prawidłowego sterowania rozpięciem energii pomiędzy jego poszczególnymi elementami, takimi jak silnik spalinowy, generator elektryczny, bateria akumulatorów czy silniki elektryczne. Pojazdy z takim napędem sprawdzają się zwłaszcza w warunkach, gdzie wykonywanych jest dużo manewrów przyspieszania i hamowania (np. aglomeracja miejska) [3]. Opracowując koncepcję hybrydowego układu napędowego górniczej lokomotywy spagowej, przeprowadzono wcześniej pomiary prędkości jazdy w rzeczywistych warunkach jej pracy, w celu uzyskania parametrów wejściowych do przeprowadzenia badań symulacyjnych. Na podstawie pomiarów założono spodziewaną efektywność stosowania napędu hybrydowego lokomotywy górniczej w warunkach pracy rzeczywistej.

2. Napęd hybrydowy lokomotywy górniczej

Efektywna praca napędu hybrydowego lokomotywy spagowej wymaga odpowiedniego sterowania przepływem energii [2, 3, 4]. Jest to proces związany z ciągłą analizą wielu sygnałów, na podstawie których dobierane są parametry elementów wykonawczych. Wpływa to na poprawę sprawności energetycznej i żywotność całego układu napędowego. Silnik spalinowy, pracując w zadanym punkcie obciążenia i prędkości obrotowej, może charakteryzować się najmniejszym zużyciem jednostkowym paliwa albo najniższą emisją spalin. W szeregowym napędzie hybrydowym przewidzianym do zastosowania w górniczej lokomotywie spagowej można wyróżnić kilka trybów pracy (rys. 1–6, gdzie: SS – silnik spalinowy, SE – silnik elektryczny, G – generator, BA – bateria akumulatorów, ZP – zbiornik paliwa, US – układ sterowania, FA – falownik, PR – prostownik, DC – szyna prądu stałego).

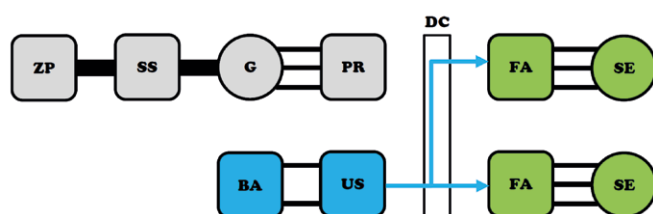
Tryb EV (*Electric Vehicle*) – jest to tryb pracy zeroemisyjny. W tym układzie silnik spalinowy nie jest włączony, a lokomotywa zasilana jest tylko energią pochodzącą z baterii akumulatorów. Tryb EV może być aktywowany tylko przez maszynistę lokomotywy i stosowany, gdy wymagana jest duża ilość rozruchów lokomotywy na krótkich odcinkach trasy, jak również w rejonach, w których znajdują się ludzie (generowany jest hałas).

Tryb HEV (*Hybrid Electric Vehicle*) – moc generatora i moc pochodząca z baterii akumulatorów służą do napędzania lokomotywy. Ten tryb pracy jest wykorzystywany podczas dużego

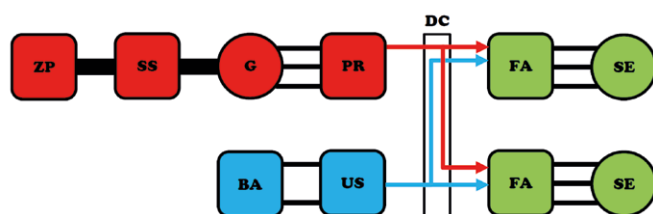
Streszczenie: Rozpowszechniane coraz szerzej napędy hybrydowe w pojazdach mają na celu obniżenie zużycia paliwa i ograniczenie emisji spalin do atmosfery. Istotą takich układów jest sterowanie rozpięciem energii pomiędzy poszczególnymi elementami napędu. W artykule przedstawiono rozwiązanie napędu hybrydowego lokomotywy górniczej oraz przedstawiono wyniki badań jej pracy na podstawie rozpięciu mocy.

ENERGY BALANCE OF HYBRID DRIVE SYSTEM OF MINE LOCOMOTIVE

Abstract: More and more popular hybrid drives in vehicles reduce fuel consumption and emission of exhaust gases. Control of power flow to the components is the system essence. Hybrid drive system of mine locomotive is presented and the results of locomotive operation are given basing on power flow.



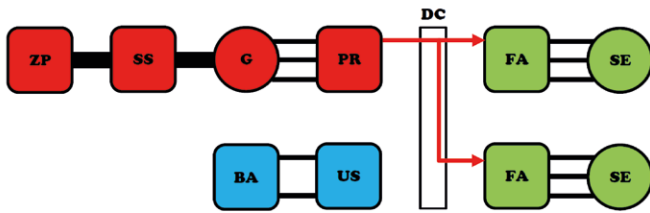
Rys. 1. Tryb EV (*Electric Vehicle*) [2]



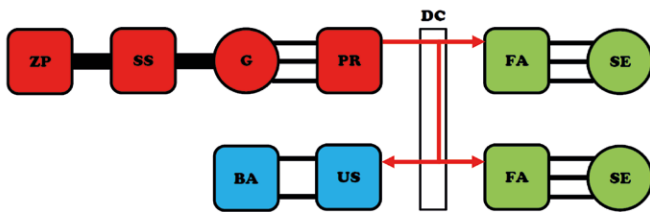
Rys. 2. Tryb HEV (*Hybrid Electric Vehicle*) [2]

zapotrzebowania na moc, np. podczas jazdy lokomotywy z wozami kopalnianymi załadowanymi urobkiem.

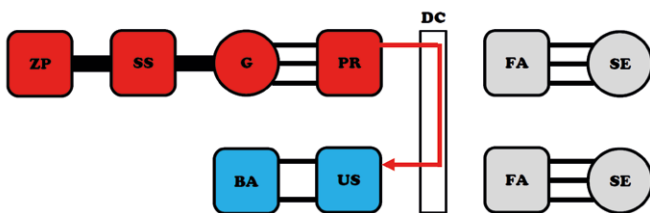
Tryb spalinowo-elektryczny bez doładowywania baterii – moc generatora wystarcza na pokrycie zapotrzebowania na



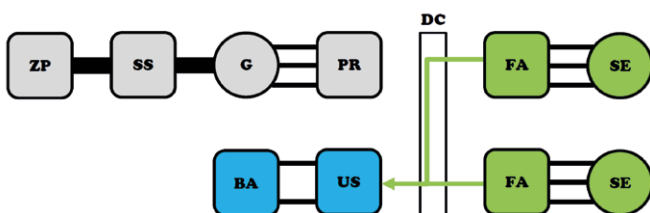
Rys. 3. Tryb spalinowo-elektryczny bez doładowywania baterii akumulatorów [2]



Rys. 4. Tryb spalinowo-elektryczny z doładowywaniem baterii akumulatorów [2]



Rys. 5. Tryb ładowania baterii akumulatorów [2]

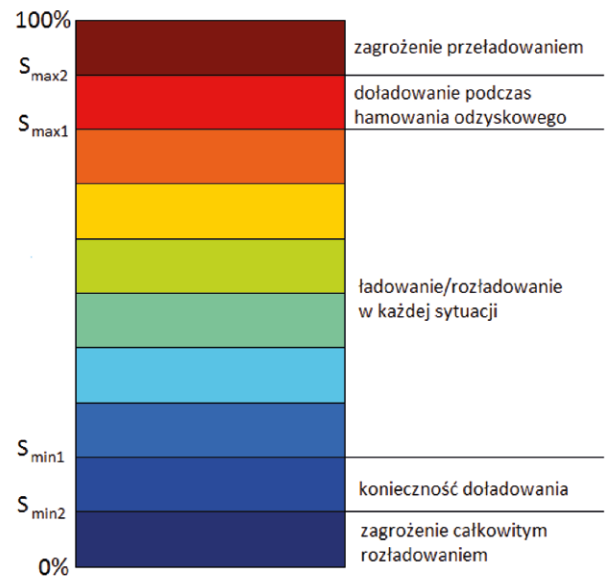


Rys. 6. Tryb hamowania odzyskowego [2]

moc układu napędowego, a bateria akumulatorów nie może gromadzić energii elektrycznej. Ten tryb jest wykorzystywany podczas niskiego zapotrzebowania na moc, np. podczas jazdy lokomotywy z pustymi wozami kopalnianymi.

Tryb spalinowo-elektryczny z doładowywaniem baterii – moc generatora wystarcza na pokrycie zapotrzebowania na moc układu napędowego, a nadwyżka wytwarzanej energii gromadzona jest w baterii akumulatorów. Ten tryb jest wykorzystywany podczas niskiego zapotrzebowania na moc, np. podczas jazdy lokomotywy z pustymi wozami kopalnianymi.

Tryb ładowania baterii – w tym trybie całkowita energia wytwarzana przez generator służy do ładowania baterii akumulatorów. Stosowany jest podczas postojów lokomotywy.



Rys. 7. Stany naładowania baterii akumulatorów [2]

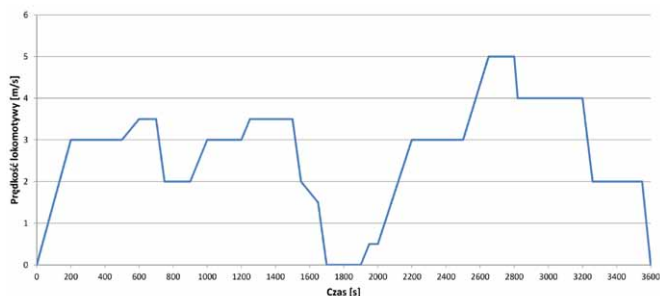
Tryb hamowania odzyskowego – podczas hamowania lokomotywy silniki napędowe pracują w trybie generatorowym, wytwarzając dodatkową energię, która może służyć do doładowania baterii akumulatorów.

Niezależnie od trybu pracy lokomotywy, algorytm sterowania powinien być informowany o aktualnym stanie naładowania baterii akumulatorów (SOC). Utrzymanie odpowiedniego poziomu naładowania baterii akumulatorów decyduje o płynności jazdy oraz zabezpiecza także przed uszkodzeniem, spowodowanym przeładowaniem lub nadmiernym rozładowaniem. Dopuszczalny stopień naładowania baterii akumulatorów powinien wynosić od 20% do 80% (rys. 7).

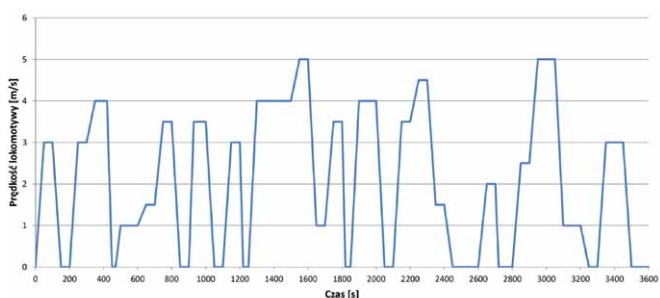
3. Badania symulacyjne hybrydowego układu napędowego górniczej lokomotywy spawowej

Analizę pracy hybrydowego układu napędowego górniczej lokomotywy spawowej przeprowadzono na podstawie badań symulacyjnych wykonanych w programie Matlab-Simulink. Polegały one na wyznaczeniu rozprywu mocy pomiędzy poszczególnymi jego elementami napędu w czasie przy równoczesnym wyznaczeniu ilości zużytego paliwa i emisji substancji toksycznych. Podczas badań odwzorowywano prędkości jazdy lokomotywy z rys. 8 i 9, podczas których lokomotywa była jednakowo obciążona. Badania wykonano dla dwóch kryteriów optymalizacji – minimalizacji emisji substancji toksycznych i minimalizacji jednostkowego zużycia paliwa. Wyniki symulacji przedstawiono na rys. 10–13.

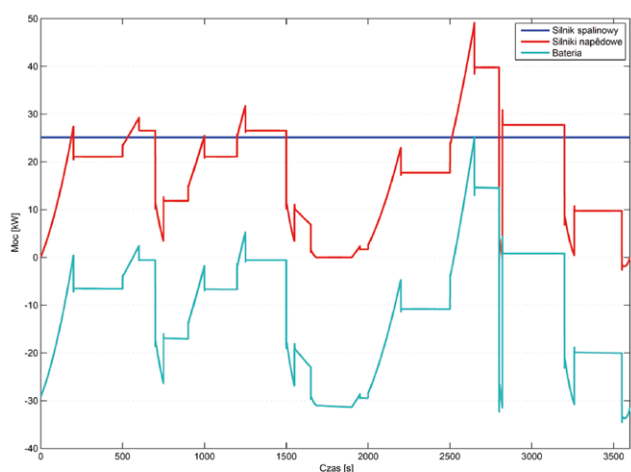
Można stwierdzić, że niezależnie od warunków pracy lokomotywy silnik spalinowy pracował w sposób ciągły, ze stałą mocą, w zadanym punkcie pracy. Pokrycie zapotrzebowania na moc silników napędowych zapewniała bateria akumulatorów. Podczas transportu urobku ok. 10% całkowitego czasu przejazdu przypadało na postój, podczas którego doładowywana była bateria akumulatorów (rys. 10 i 11). Energia ta wykorzystywana



Rys. 8. Prędkość jazdy lokomotywy transportującej urobek



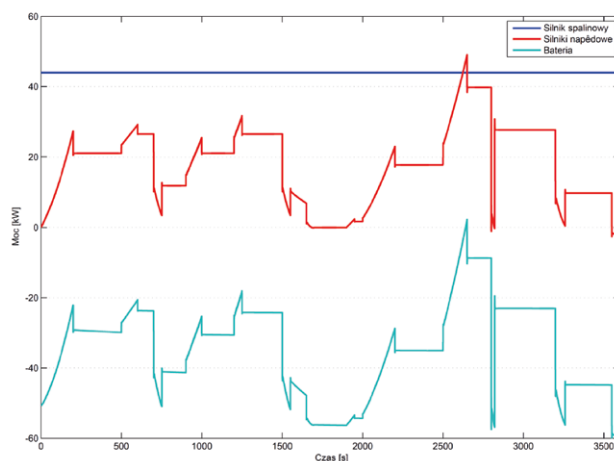
Rys. 9. Prędkość jazdy lokomotywy transportującej materiał



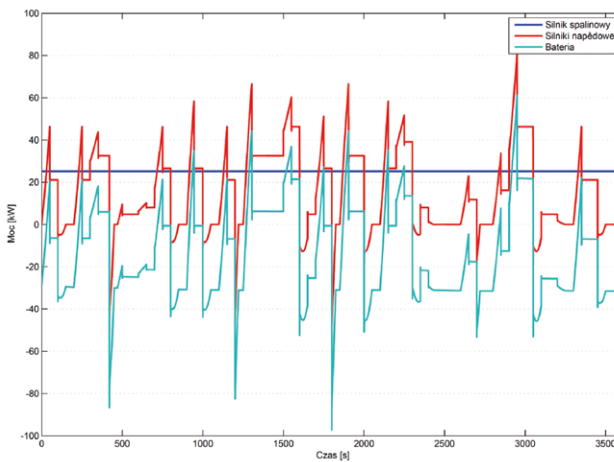
Rys. 10. Rozpływ mocy w hybrydowym układzie napędowym lokomotywy transportującej urobek według kryterium minimalizacji emisji substancji toksycznych [2]

była następnie do rozpędzania lokomotywy do jazdy z dużą prędkością i obciążeniem. Zaletą napędu hybrydowego w takich warunkach pracy była możliwość odzysku energii podczas częstych hamowań, wykorzystywanej następnie do przyspieszania. W tabeli 1 przedstawiono przyrosty stanu naładowania baterii (SOC) dla jazdy lokomotywy w trybie hybrydowym (HEV) i elektrycznym (EV), wyznaczone podczas symulacji (rys. 10–13).

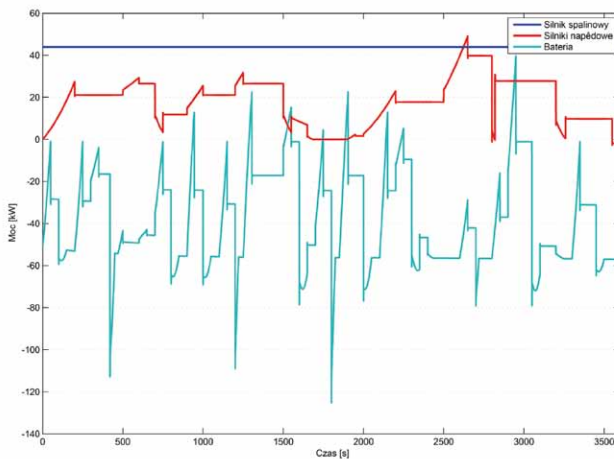
Na podstawie danych zawartych w tabeli 1, za pomocą układu równań (1) i (2), sprawdzono stan naładowania baterii aku-



Rys. 11. Rozpływ mocy w hybrydowym układzie napędowym lokomotywy transportującej urobek według kryterium minimalizacji jednostkowego zużycia paliwa [2]



Rys. 12. Rozpływ mocy w hybrydowym układzie napędowym lokomotywy transportującej materiał według kryterium minimalizacji emisji substancji toksycznych [2]



Rys. 13. Rozpływ mocy w hybrydowym układzie napędowym lokomotywy transportującej materiał według kryterium minimalizacji jednostkowego zużycia paliwa [2]

Tabela 1. Procentowy przyrost stanu naładowania baterii akumulatorów podczas zadanych jazd lokomotywy [2]

Transport urobku				Transport materiałów			
Kryterium minimalnej emisji substancji toksycznych		Kryterium minimalizacji zużycia paliwa		Kryterium minimalnej emisji substancji toksycznych		Kryterium minimalizacji zużycia paliwa	
HEV	EV	HEV	EV	HEV	EV	HEV	EV
+14,8%	-28,8%	+47,3%	-28,8%	+18,8%	-24,9%	+51,3%	-24,9%

Tabela 2. Emisja oraz zużycie paliwa lokomotywy (Q – ilość zużytego paliwa, CO – tlenek węgla, HC – węglowodór, NOx – tlenek azotu)

		Q [l]	CO [g]	HC [g]	NOx [g]	CO+HC+NOx [g]
Transport urobku	Kryterium minimalnej emisji jednostkowej substancji toksycznych	5,27	16,74	3,60	74,76	95,1
	Kryterium minimalizacji jednostkowego zużycia paliwa	4,5	27,48	2,54	100,28	130,3
Transport materiałów	Kryterium minimalnej emisji jednostkowej substancji toksycznych	4,55	14,46	3,11	64,56	82,13
	Kryterium minimalizacji jednostkowego zużycia paliwa	4,4	26,76	2,47	97,64	126,87

mulatorów do stanu początkowego, wyznaczając tym samym rzeczywiste spalanie oraz emisję spalin. Wyniki te zestawiono w tabeli 2.

$$\begin{cases} 1 = L_{HEV} + L_{EV} \\ 0 = SOC_{HEV} \cdot L_{HEV} + SOC_{EV} \cdot L_{EV} \end{cases} \quad (1)$$

- L_{HEV} – liczba cykli jazd lokomotywy w trybie hybrydowym;
- L_{EV} – liczba cykli jazd lokomotywy w trybie elektrycznym;
- SOC_{HEV} – procentowy przyrost stanu naładowania baterii akumulatorów podczas jazdy lokomotywy w trybie hybrydowym;
- SOC_{EV} – procentowy przyrost stanu naładowania baterii akumulatorów podczas jazdy lokomotywy w trybie elektrycznym.

$$\begin{cases} g_c = g_H \cdot L_{HEV} \\ e_{cCO} = e_{HCO} \cdot L_{HEV} \\ e_{cHC} = e_{HHC} \cdot L_{HEV} \\ e_{cNOx} = e_{HNOx} \cdot L_{HEV} \end{cases} \quad (2)$$

- g_c – całkowite zużycie paliwa;
- g_H – zużycie paliwa w trybie hybrydowym;
- e_{cCO} , e_{cHC} , e_{cNOx} – emisja całkowita składników spalin;
- e_{HCO} , e_{HHC} , e_{HNOx} – emisja składników spalin w trybie hybrydowym.

Można stwierdzić, że przy tej samej masie ciągnącego zestawu mniejsze jest zużycie paliwa, jak i mniejsza jest ilość substancji toksycznych wydalanych do środowiska. Kryterium optymalizacji napędu hybrydowego lokomotywy górniczej powinno być zatem stosowane w zależności od miejsca, w którym lokomotywa będzie pracowała. W rejonach, w których znajdują się ludzie, korzystniej będzie stosować kryterium minimalizacji emisji substancji toksycznych do środowiska. W innych przypadkach można zastosować kryterium minimalizacji jednostkowego zużycia paliwa.

4. Podsumowanie

Sterowanie hybrydowym układem napędowym lokomotywy górniczej, powinno uwzględniać warunki, w jakich będzie ona pracowała. Podczas transportu urobku lokomotywa nie wykonuje częstych manewrów przyspieszania i hamowania. Jej cykl jazdy można porównać do jazdy samochodem po autostradzie. Stosowanie napędu hybrydowego będzie wtedy nieefektywne. Również kilkuminutowy postój lokomotywy, podczas którego bateria akumulatorów jest doładowywana, można uznać za nieuzasadniony. Należy wówczas wyłączyć silnik spaliny. Natomiast napęd hybrydowy zastosowany w lokomotywie transportującej materiały jest uzasadniony. Częste manewry przyspieszania i hamowania wymagają zapasu mocy, który zapewnia bateria akumulatorów. W tym przypadku zastosowanie lokomotywy z napędem spalinowym skutkuje pracą silnika spalinowego w najmniej korzystnym zakresie pracy.

Literatura

- [1] KONSEK R., MĘŻYK A.: *Symulacja cyklu pracy hybrydowego układu napędowego górniczej lokomotywy spągowej*. „Maszyny Elektryczne, Zeszyty Problemowe” 1/2015, s. 1–5.
- [2] KONSEK R.: *Optymalizacja hybrydowego układu napędowego lokomotywy spągowej w aspekcie minimalizacji emisji substancji toksycznych*. Praca statutowa ITG KOMAG 2013-2015 (niepublikowana).
- [3] KONSEK R.: *Rozwój pojazdów użytkowych i maszyn roboczych o napędzie hybrydowym*. „Maszyny Górnicze” 3/2013, s. 53–59.
- [4] FICE M.: *Strategia zarządzania rozplywem mocy w napędzie hybrydowym o strukturze równoległej*. „Maszyny Elektryczne, Zeszyty Problemowe” 90/2011, s. 111–116.
- [5] GRZESIAK L., UFNALSKI B., KASZEWSKI A., GĄBKA G., ROSZCZYK P.: *Power mangament in series hybrid drive*. „Przegląd Elektrotechniczny” 4b/2012, s. 304–308.

✉ Rafał Konsek – Instytut Techniki Górniczej KOMAG
Arkadiusz Mężyk – Politechnika Śląska

artykuł recenzowany