

Nowoczesne systemy hamowania wysokowydajnych miejskich samochodów elektrycznych

Modern braking systems for high-efficient urban electric vehicles

ADRIAN KUBIESA
JAKUB PASZEK
RYSZARD SKOBERLA*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.1.12>

Szybki rozwój motoryzacji, bazujący na elektrycznych bądź hybrydowych układach napędowych, wymusza na konstruktorach konieczność wdrażania nowych rozwiązań. Jednym z przykładów jest rozwój systemów hamowania. Artykuł jest próbą zaprezentowania, w jaki sposób rozwój systemów hamowania wpłynął na poprawę wydajności pojazdów elektrycznych poprzez zastosowanie hamowania rekuperacyjnego czy wykorzystanie elektromechanicznych systemów hamowania. **SŁOWA KLUCZOWE:** układ hamulcowy, wysokowydajne pojazdy, hamowanie rekuperacyjne

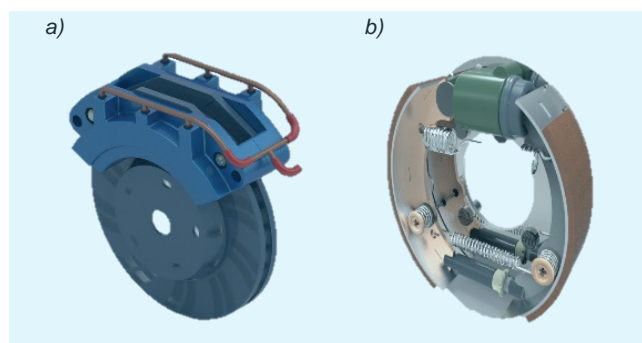
Fast and dynamic development of automotive industry, especially in electric and hybrid drive field, forces on engineers elaboration of new solutions in a car design. An example of this process is a braking system. This paper is an attempt to show how modern braking systems help improve energy efficient by implementation of a regenerative braking and use of electromechanically braking systems.

KEYWORDS: braking system, high-efficient vehicles, regenerative braking

Ciągle poszukiwanie oszczędności, dynamiczny rozwój ekologicznych technologii i opracowywanie sposobów efektywnego wykorzystywania zasobów znalazły odzwierciedlenie w branży motoryzacyjnej. Badane są rozwiązania umożliwiające ograniczenie zużycia paliwa, zmniejszanie oporów, a także wykorzystanie energii traconej. Jednym z podzespołów pozwalających na realizację tych postulatów jest układ hamulcowy, którego zadaniem jest umożliwienie wytracania prędkości poprzez konwersję energii kinetycznej pojazdu na energię cieplną. W konwencjonalnych hamulcach energia cieplna, powstająca w wyniku tarcia okładzin ciernych o powierzchnie boczne tarczy hamulcowej albo powierzchnię wewnętrzną bębna hamulcowego, jest tracona poprzez wymianę ciepła z otoczeniem.

Na rys. 1 przedstawiono elementy wykonawcze popularnych układów hamulcowych: hamulec tarczowy i hamulec bębnowy. Stanowią one nadal podstawę układów hamulcowych pojazdów, aczkolwiek hamulce bębnowe są coraz rzadziej spotykane. Układy te mają duży po-

tencjał ze względu na znaczną ilość energii traconej pod postacią ciepła wydzielającego się na elementach wykonawczych rozgrzewających się do wysokiej temperatury, zwłaszcza podczas jazdy w cyklu miejskim. Dlatego badania w znacznej mierze skupiają się na opracowywaniu sposobów odzysku tej energii.



Rys. 1. Elementy wykonawcze konwencjonalnych układów hamulcowych: a) hamulec tarczowy, b) hamulec bębnowy

Straty energetyczne generowane przez proces hamowania nie stanowią znacznego problemu w konwencjonalnych układach napędowych, bazujących na jednostkach napędowych wykorzystujących proces spalania mieszanki paliwowo-powietrznej. Natomiast w przypadku napędów elektrycznych każda strata energii jest problemem. Pojazdy elektryczne mają ograniczoną pojemność magazynów energii (akumulatorów, superkondensatorów), a każdorazowe doładowanie wymaga czasu i odpowiednich warunków. Stąd w konstrukcjach nastawionych na jak najefektywniejsze wykorzystywanie energii zaczęto stosować specjalne rozwiązania, których zadaniem jest:

- ograniczanie strat energii powstającej w trakcie hamowania,
- odzysk energii i ponowne jej wykorzystanie.

W tym celu w ramach nowoczesnych konstrukcji pojazdów coraz powszechniej stosuje się układy KERS (*kinetic energy recovery system*) – zarówno w postaci układów mechanicznych, jak i elektrycznych. Dodatkowo używa się wyspecjalizowanych systemów elektronicznych, np. *brake-by-wire*, których zadaniem jest dobór odpowiedniej strategii hamowania, aby dobrze wykorzystać energię pojazdu.

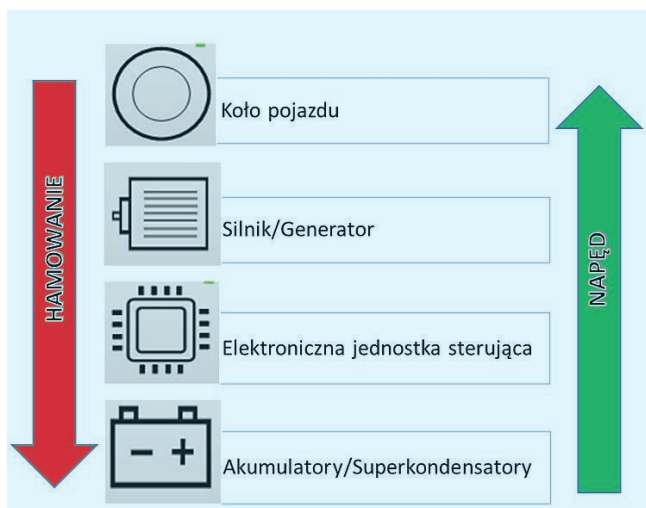
* Adrian Kubiesa (adrikub346@student.polsl.pl), Jakub Paszek (jakupas973@student.polsl.pl), mgr inż. Ryszard Skoberla (ryszard.skoberla@polsl.pl) – Politechnika Śląska

Systemy odzyskiwania energii hamowania

Specyfika ruchu miejskiego wymusza częste zatrzymywanie bądź spowalnianie pojazdu, a konieczność redukcji prędkości powoduje, że zgromadzona energia kinetyczna zostaje wytracana i zamienia się w ciepło. Konstruktorzy, chcąc zwiększyć zasięg samochodów, opracowali systemy odzysku energii hamowania. Ich zadaniem jest zmniejszanie prędkości samochodu poprzez zmianę energii kinetycznej poruszającego się pojazdu na formę energii możliwą do gromadzenia, aby ponownie ją wykorzystać. Zmagazynowana energia może posłużyć do bezpośredniego napędzania kół lub doładowywania akumulatorów [1–2].

W zależności od sposobu magazynowania energii układy hamowania odzyskowego można podzielić na elektryczne i mechaniczne.

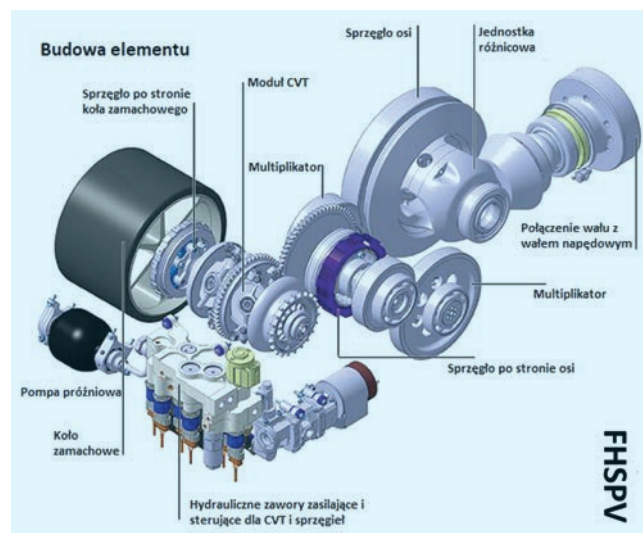
W elektrycznym układzie odzysku energii elementem odpowiedzialnym za zmianę energii kinetycznej w elektryczną jest silnik pojazdu, który w czasie hamowania przyjmuje rolę generatora. Przepływ energii w elektrycznym układzie odzysku energii przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat przepływu energii w układzie napędowym w konfiguracji napędu (kolor zielony) oraz hamowania regeneracyjnego (kolor czerwony) [1]

Podczas hamowania energia przekazywana jest z kół do generatora. Tam, pod kontrolą jednostki sterującej, generowana jest energia elektryczna. Wytworzony zapas energii elektrycznej magazynowany jest w akumulatorach pojazdu lub w superkondensatorach. Większość elementów układu odzysku energii stanowią elementy będące częścią układu napędowego, co powoduje, że implementacja hamowania regeneracyjnego nie wymaga znaczącego zwiększenia masy pojazdu [1–2]. Stosowanie odzysku energii hamowania pozwala na zmniejszenie rozmiaru elementów klasycznego układu, co korzystnie wpływa na masę samochodu, lecz nie eliminuje konieczności wyposażenia samochodu w hamulce cierne. Stosowane są one w sytuacjach awaryjnych bądź jako hamulec postojowy. Wadą rozwiązania, w którym silnik elektryczny podczas hamowania pełni rolę generatora, jest możliwość stosowania hamowania regeneracyjnego tylko na kołach napędowych. Kolejnym ograniczeniem jest niewystarczająca sprawność odzysku, co oznacza także niedostateczną sprawność hamowania przy niskich prędkościach [1–3].

W mechanicznym układzie odzysku energia kinetyczna poruszającego się pojazdu jest zamieniana w energię kinetyczną ruchu obrotowego koła zamachowego. W trakcie wytracania prędkości przez samochód koło zamachowe zostaje rozpędzone do wysokiej prędkości obrotowej, stając się magazynem energii. Układ odzysku połączony jest z układem napędowym za pomocą szeregu sprzęgieł pozwalających kontrolować ilość energii trafiającej do kół podczas wykorzystywania nagromadzonej energii do napędu pojazdu. Aby zmniejszyć opory ruchu, koło zamachowe umieszczono w próżni. Elementy tworzące mechaniczny układ odzysku energii przedstawiono na rys. 3 [1–3].

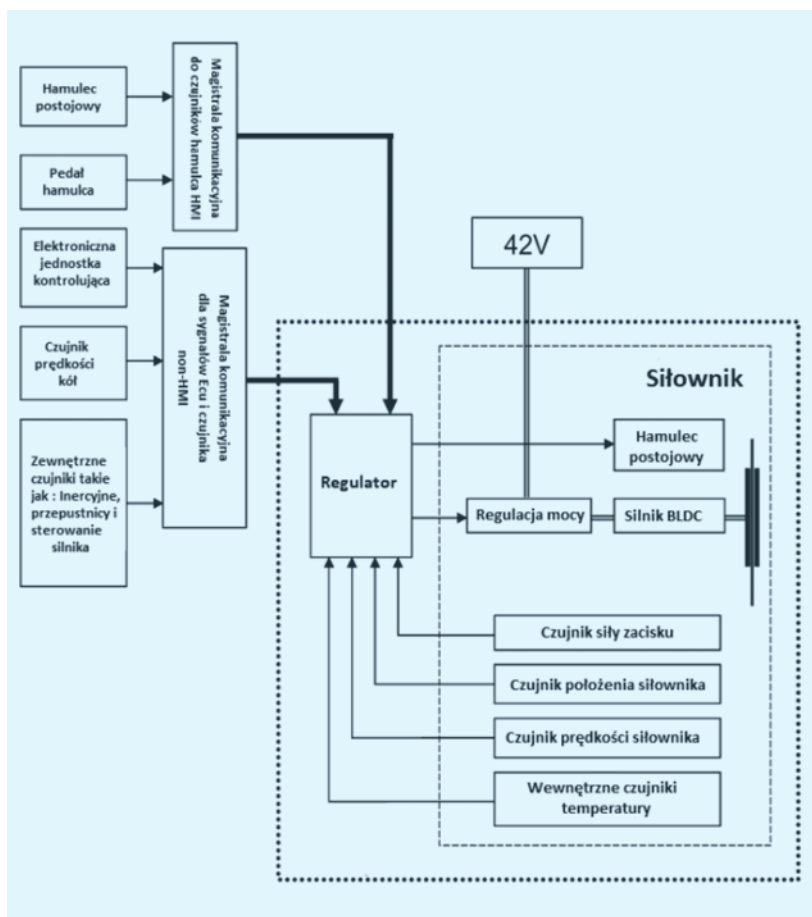


Rys. 3. Elementy mechanicznego systemu odzyskiwania energii z hamowania [3]

System brake-by-wire

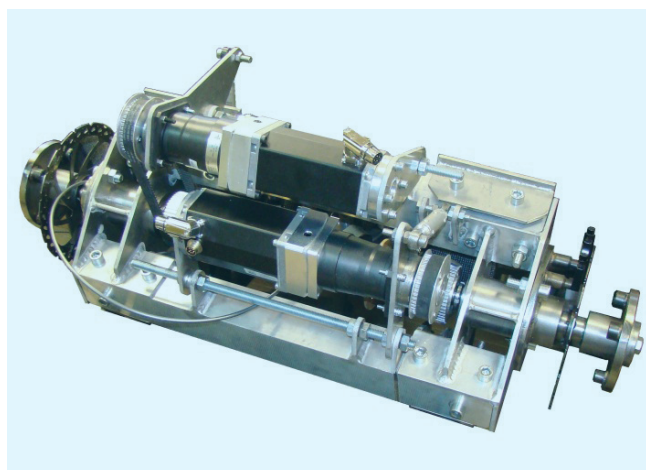
Ważnym elementem nowoczesnych układów hamulcowych są układy elektroniczne. Stosowanie odzysku energii wraz z konwencjonalnym układem hamulcowym wymusiło na konstruktorach stworzenie nowego systemu, w którym oba układy będą płynnie i niezawodnie współpracować. Przykładem takiego systemu jest tzw. *brake-by-wire* [4]. Zapewnia on elektroniczną kontrolę nad układem hamulcowym, której zadaniem jest sterowanie rozdziałem sił hamowania, zapewnienie przewidywalnej reakcji na wciśnięcie pedału hamulca, a także utrzymanie jak największej efektywności odzyskiwania energii. W odróżnieniu od klasycznego układu, gdzie nośnikiem sygnału od pedału hamulca do zacisków hamulcowych jest płyn hydrauliczny wypełniający przewody hamulcowe [4–5], w systemie *brake-by-wire* sygnał hamowania ma postać impulsu elektrycznego generowanego w momencie wciśnięcia pedału hamulca. Zaletą tego rozwiązania jest redukcja masy pojazdu poprzez ograniczenie długości przewodów hydraulicznych i ilości płynu hamulcowego, co przekłada się na mniejsze zużycie energii oraz zwiększenie zasięgu. Na rys. 4 przedstawiono schemat typowego układu EBS (*electromechanical braking system*) [5].

W systemie EBS w momencie wciśnięcia pedału hamulca układ mierzy siłę nacisku. Sygnał ten jest przekazywany do jednostki sterującej, której zadaniem jest wygenerowanie sygnału do układu hamulcowego. Tam – po uwzględnieniu dodatkowych informacji z systemu odzysku oraz parametrów jazdy – generowany jest sygnał



Rys. 4. Schemat elektromechanicznego systemu hamulcowego [3]

sterujący hamowaniem. Jeśli zapotrzebowanie na siłę hamowania jest większe niż układ hamowania regeneracyjnego jest w stanie zapewnić, bądź gdy pojazd porusza się z niską prędkością i musi zostać zatrzymany, system uruchamia hamulce cierne [4–5]. Z systemem *brake-by-wire* zintegrowane są również systemy ABS (*anti-lock braking system*) oraz ESC (*electronic stability control*). Dane z czujników dodatkowych systemów także trafiają do komputera zawiadującego systemem. Sposób rozdzielenia sił hamowania na układy hamulcowe może być modyfikowany w zależności od trybu jazdy. Odpowiednie mapowanie oraz dobór charakterystyk hamowania pozwalają na lepsze dopasowanie sposobu hamowania do warunków i stylu jazdy kierowcy [4–5].



Rys. 5. Układ napędowy wysokosprawnego pojazdu elektrycznego z odzyskiem energii [7]

Bieżące badania

Na Politechnice Śląskiej prowadzone są badania nad wysoko wydajnymi rozwiązaniami dla branży motoryzacyjnej. Tą tematyką zajmuje się np. zespół Smart Power, zrzeszający studentów, którzy pod opieką naukowców prowadzą prace zorientowane na konstruowanie wysokosprawnego pojazdu elektrycznego. Obecnie wysiłki skupiają się m.in. na modyfikacji układu napędowego umożliwiającego odzysk energii z hamowania [6–7].

Układ napędowy, będący punktem wyjścia wspomnianych rozważań, przedstawiono na rys. 5. Badania i symulacje oparte na modelu matematycznym pojazdu pozwalają oczekiwać znacznych korzyści z zaimplementowania powstającego systemu.

Podsumowanie

Dynamiczny rozwój pojazdów wykorzystujących alternatywne układy napędowe wymusza konieczność adaptacji pozostałych podzespołów pojazdu. Jednym z ważniejszych podzespołów jest układ hamulcowy, który bezpośrednio odpowiada za bezpieczeństwo kierowcy. Konieczność pogodzenia kwestii związanych z bezpieczeństwem oraz chęci zwiększania efektywności wykorzystania energii wymusza opracowanie nowych rozwiązań, takich jak systemy odzyskiwania energii czy *brake-by-wire*. Układy hamowania rekuperacyjnego pozwalają odzyskiwać część energii traconej w trakcie hamowania i zwiększać zasięg pojazdu. Jednakże bez wsparcia ze strony elektronicznych systemów wspomagających hamowanie są one bezużyteczne. Systemy EBS, wykorzystujące *brake-by-wire*, pozwalają na odzysk jeszcze większych ilości energii z jednoczesnym ograniczeniem masy pojazdu. Kierunki rozwoju wskazują, że pojazdy elektryczne i hybrydowe stanowią przyszłość motoryzacji. W świetle dążeń proekologicznych opracowanie sposobów efektywnego wykorzystywania ograniczonych zasobów stanowi poważne wyzwanie dla konstruktorów zarówno w kontekście odzysku energii, jak i odpowiedniego nią zarządzania.

LITERATURA

1. Cikanek S.R., Bailey K.E. "Regenerative braking system for a hybrid electric vehicle". *American Control Conference*. 2002.
2. Peng D., Zhang Y., Yin C.L., Zhang J.W. "Combined control of a regenerative braking and antilock braking system for hybrid electric vehicles". *International Journal of Automotive Technology*. 2008.
3. <https://www.wired.com/2010/10/flywheel-hybrid-system-for-premium-vehicles/> (dostęp: 26.11.2017).
4. Canuto F., Turco P., Colombo D. "Control development process of the brake-by-wire system". *Proceedings of 8th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis*. 2006.
5. Hoseinnezhad R., Bab-Hadiashar A. "Automatic calibration of resolver sensors in electro-mechanical braking systems: A modified recursive weighted least squares approach". *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2007.
6. Skoberla R., Skarka W. "Design of braking system in the light-weight electric vehicle". *Zeszyty naukowe Instytutu pojazdów Politechniki Warszawskiej*. 2 (2016): s. 77–83.
7. Skoberla R., Skarka W. "Układ napędowy lekkiego pojazdu elektrycznego biorącego udział w zawodach Shell Eco-marathon". *Mechanik*. 4 (2016): s. 324–325.