

Przykłady elektrycznych napędów trakcyjnych. Cz. 3. Samochodowy napęd elektryczny

Andrzej Dębowski

W Polsce już w latach osiemdziesiątych XX wieku prof. Eugeniusz Popławski ze swoim zespołem podjął w Politechnice Świętokrzyskiej systematyczne badania nad elektrycznym napędem nadającym się do zainstalowania w seryjnie produkowanych samochodach elektrycznych [A34]. Taką pierwszą próbą było zainstalowanie w karoserii Fiata 125p typowego przemysłowego silnika asynchronicznego zasilanego z falownika tyrystorowego. Źródłem energii był zestaw zwykłych, ciężkich akumulatorów kwasowo-ołowiowych ulokowany w bagażniku samochodu. Z perspektywy współczesnych osiągnięć konstrukcyjnych wielkich światowych koncernów samochodowych można tamte próby ocenić jako nieco nie-realistyczne. Warto jednak pamiętać, że w owym czasie nie było jeszcze tych znanych obecnie, ważnych współczesnych osiągnięć technologicznych, jakimi są nowe materiały i technologie, pozwalające na miniaturyzację całości osprzętu samochodu wyposażonego w napęd elektryczny. Do tych osiągnięć myśli naukowej i technicznej należy przede wszystkim zaliczyć mikroprocesorowo sterowane przekształtniki energoelektroniczne, produkowane z dużym udziałem pierwiastków ziem rzadkich silne magnesy pozwalające na kompaktową budowę silników napędowych o zmniejszonych wymiarach i wadze oraz wydajne i lekkie baterie chemiczne o dużej pojemności.

Samochody elektryczne stały się obecnie przedmiotem wielkiego zainteresowania na całym świecie, przede wszystkim ludzi odpowiedzialnych za:

- rozwój gospodarczy (szczególnie w tych w krajach, które odgrywają wiodącą rolę w gospodarce i narzucają całemu światu kierunek postępu technicznego);
- gospodarowanie światowymi zasobami surowców energetycznych (w tym za pozyskiwanie energii ze źródeł odnawialnych);
- stan środowiska naturalnego (ze szczególnym uwzględnieniem zmian klimatycznych oraz zanieczyszczeń powodowanych przez dotychczasowe formy pozyskiwania i przetwarzania energii);
- postęp techniczny związany z przemysłem energetycznym, a także naukowców poszukujących ciągle najlepszych rozwiązań w tych dziedzinach na drodze rozważań teoretycznych i badań laboratoryjnych.

Przy tej okazji warto zauważyć, że w publicznym odbiorze wszelkich dyskusji związanych z tym tematem zakłada się często (a chyba niesłusznie), że wszelkie używanie energii elektrycznej samo w sobie nie szkodzi środowisku. Jest to pogląd nie do końca słuszny. Pierwszy przykład, ostatnio dostrzeżony przy okazji analizy zdjęć powierzchni Ziemi robionych z kosmosu i szeroko komentowany w mediach: zauważalny

w skali kosmicznej wzrost rozświetlenia powierzchni Ziemi w nocy. Spowodowane to jest intensywnym oświetlaniem nocną porą wszelkich terenów zamieszkałych przez ludzi (czy to jest naprawdę potrzebne, czy nie). To te źródła światła – i małe, i duże – wspólnie już praktycznie wszystkie są zasilane wyłącznie energią elektryczną. Czyli to energia elektryczna w skali globalnej przyczynia się do tak dużego rozjaśnienia nocnego nieba obserwowanego z powierzchni Ziemi, że staje się to powodem zauważalnych zmian w zachowaniu się wszystkich żyjących na Ziemi gatunków – zwierząt, roślin, a także samych ludzi. Drugim przykładem jest to, że do produkcji energii elektrycznej wykorzystywane są obecnie głównie surowce kopalne spalane w kotłach elektrowni ciepłych. Wprawdzie sama energia elektryczna nie szkodzi środowisku, ale dotychczasowe metody jej pozyskiwania – jak najbardziej. To szkodenie odbywa się pośrednio, w wyniku wzrostu intensywności „podgrzewania atmosfery” otulającej Ziemię. To powoduje groźne zmiany klimatyczne, nie tylko większą częstotliwość pojawiania się groźnych, bardzo silnych wiatrów o niespotykanej wcześniej sile (huragany), ale także pociąga za sobą bardziej intensywne topnienie naturalnych zasobów lodu (lodowców w górach, pokrywy lodowej w Arktyce czy na Antarktydzie). Wprawdzie uważa się, że jest to głównie skutek tzw. efektu cieplarnianego, powodowanego niekontrolowanym, nadmiernym wzrostem CO₂ w atmosferze, przez co więcej ciepła pochodzącego od naturalnego promieniowania Słońca pozostaje „uwięzione” na Ziemi w atmosferze oraz na powierzchni lądów i oceanów. Ale przy tej okazji należy także zauważyć, że obecnie wszelka działalność ludzka także wiąże się z uwalnianiem do otoczenia ciepła w czystej postaci na niespotykaną wcześniej skalę, w wyniku przetwarzania coraz większej ilości energii w najrozmaitszych postaciach – a więc także i samej, wyprodukowanej „brudnymi metodami” już wcześniej, energii elektrycznej. Wykorzystywanie energii elektrycznej nie tylko do ogrzewania, ale i do chłodzenia (w systemach klimatyzacji) zawsze wiąże się z jej sporymi stratami, a takie straty i tak w końcu zostają zamienione na ciepło, które przechodzi do otoczenia.

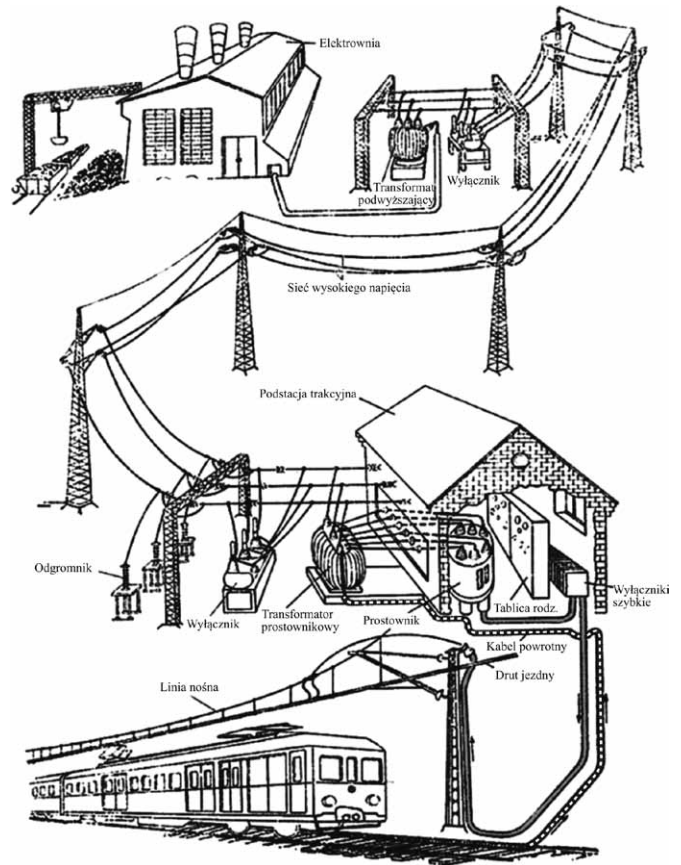
Dlatego przy okazji omawiania zagadnień związanych z elektrycznym napędem trakcyjnym nie sposób nie odnieść się do zagadnień związanych ogólnie z transportem ludzi i towarów. Codzienne przemieszczanie ich na bliższe i dalsze odległości w przeważającym stopniu jest realizowane przez pojazdy kołowe poruszające się po powierzchni ziemi, co w skali całego globu wymaga ciągłego zużywania ogromnych ilości energii. Ta energia jest potrzebna nie tylko bezpośrednio do poruszania samych pojazdów wraz z ich ładunkiem, i ta jej tak zużywana

część może być w sensie uogólnionym nazwana „paliwem”, ale także do wyprodukowania tego „paliwa” i do dostarczenia go do samego pojazdu. Obrazowo złożoność całego procesu związanego z dostarczaniem określonego rodzaju energii (stanowiącej „paliwo”) do dowolnego rodzaju pojazdu można zrozumieć, przyglądając się uważnie rysunkowi 1. Patrząc nań dosłownie, dostrzega się kompletny obraz zasilania w energię elektryczną, dostarczaną z podwieszonych na słupach przewodów sieci trakcyjnej, pewnego pojazdu szynowego – w tym przypadku pociągu elektrycznego (ale niemal dokładnie tak samo dotyczy to także tramwaju czy trolejbusu). Ale w tle widać nie tylko elektrownię produkującą tę „czystą” energię z bardzo „brudnego” węgla (ze sprawnością nieprzekraczającą, jak wiadomo każdemu elektrykowi, ok. 45%), widać także przesyłową sieć elektroenergetyczną i najbliższą pojazdowi w danej chwili sekcyjną podstację trakcyjną. Nawet jeśli sam napęd elektryczny zainstalowany w pojeździe ma wysoką sprawność, to i tak sprawność całego tego „ciągu zasilającego” nie przekroczy 50%. Czyli w tym przypadku ponad połowa energii „wyzwolonej” ze spalonego węgla w różnych postaciach (czyli różnymi drogami) i tak trafi w końcu do otaczającego nas płaszczą kuli ziemskiej – atmosfery wraz z chmurami, wód powierzchniowych czy gleby.

Rysunek 1 pozwala dostrzec pewien ogólny schemat strukturalny obrazujący proces pozyskiwania energii w postaci dowolnego rodzaju paliwa i jego końcowego dostarczenia do pojazdów (nie tylko kołowych), po to, aby mogły się one poruszać. Ten schemat zawsze składa się z trzech etapów: produkcji (elektrownia), przesyłu (sieć elektroenergetyczna) oraz końcowej dostawy (dystrybutory). W sposób oczywisty dotyczy to takich pojazdów samochodowych, jak trolejbusy używane w masowej komunikacji miejskiej.

Dlatego więc ten temat został poruszony właśnie w podrozdziale poświęconym napędom elektrycznym samochodów, czyli pojazdów wyposażonych we własne, mobilne magazyny energii? Czyli w przypadku takich samochodów – magazyny energii elektrycznej, a więc niejako z definicji pojazdów w 100% ekologicznie czystych! Odpowiedź jest prosta. Jak już wspomniano wyżej, tzw. powszechna motoryzacja oparta na pojazdach z ogumionymi kołami, a zwłaszcza indywidualnie używane prywatne samochody, wydają się obecnie wielu ludziom sprawą najważniejszą na świecie, bo przecież dotyczy ona ich osobiście, bezpośrednio i codziennie. Inne rodzaje pojazdów lądowych, poruszających się po innych szlakach niż drogi bite, szosy i autostrady, użytkowane są od tak wielu lat, i stały się tak trwałym i niezbędnym elementem życia wszystkich ludzi, że mało komu przychodzi do głowy, aby coś w tej sprawie natychmiast zmieniać.

Jak wynika z popularnych rozmów i dyskusji prowadzonych w prasie, radiu czy w telewizji, zdecydowana większość potencjalnych użytkowników samochodów w pełni elektrycznych (BEV, ang. *battery electric vehicle*), czyli zasilanych z baterii akumulatorów umieszczonych wewnątrz takich pojazdów [C11], wydaje się być bardzo dumna z faktu, że decydując się na ten zakup – zwykle w tej czy innej postaci jeszcze dotowany przez państwa, a pomimo to bardzo drogi, wydatnie przyczynia się do ochrony środowiska. Ich wiara w prawidłowość takiego kierunku postępu gospodarczego i technologicznego



Rys. 1. Poglądowy schemat zasilania w energię kolei elektrycznej korzystającej z sieci trakcyjnej prądu stałego

Źródło: [A4]

jest podbudowana głównie nadzieją, że masowa produkcja – na siłę wymuszona decyzjami polityczno-gospodarczymi – spowoduje wkrótce znaczne obniżenie cen takich pojazdów, a to przecież przyniesie ludzkości same korzyści. Tego rodzaju zwolenników rozwoju trakcyjnych napędów elektrycznych można rozpoznać, zadając im pytanie, skąd wezmą prąd elektryczny do ładowania baterii w tych superekologicznych samochodach. Najczęściej udzielana odpowiedź jest łatwa do przewidzenia: „To proste – z gniazdek stacji ładujących akumulatory samochodów elektrycznych, rozmieszczonych możliwie jak najgłębiej blisko planowanej trasy przejazdu”. Taka odpowiedź świadczy o zupełnym braku wyobraźni technicznej i ekonomicznej, bo skupia uwagę rozmówcy na problemach możliwych do rozwiązania w krótkim czasie jedynie w najbogatszych krajach świata. Ale największy udział w wytwarzaniu wszystkich omówionych tu wcześniej zanieczyszczeń mają przecież nie te elitarne kraje, a przede wszystkim kraje biedne i gęsto zaludnione. Więc to nie potencjalni nabywcy najdroższych w tej chwili samochodów na świecie i nie ich producenci (a więc nie mechanizmy rynkowe) powinni mieć decydujący wpływ na podejmowane decyzje dotyczące kierunków dalszego rozwoju napędów trakcyjnych w pojazdach. Nieprzemyślanymi do końca subsydiami państwowymi można więc wypaczyć wnioski, które w zgodzie z istniejącymi prawami fizyki da się wyciągnąć z uczciwie prowadzonych analiz ekonomicznych opartych na ciągłe

aktualizowanych danych dotyczących prawdziwego stanu środowiska (tj. atmosfery, wód oceanicznych i powierzchni łądów) oraz danych dotyczących stanu infrastruktury przemysłowej i materialnej gospodarki.

Na problem ten zwraca się już coraz powszechniej uwagę przy okazji dyskusji na temat wprowadzania tzw. transportu zrównoważonego (ang. *sustainable transport*) [C11]. Pojęcie to odnosi się do tematów związanych z szeroko pojętym transportem, który pozostaje zrównoważony pod względem skutków społecznych, środowiskowych i klimatycznych oraz zdolności do globalnego dostarczania energii źródłowej w nieskończoność. Składniki służące ocenie zrównoważonego rozwoju obejmują: 1) poszczególne pojazdy wykorzystywane do transportu drogowego, wodnego lub lotniczego; 2) źródło energii; 3) infrastrukturę wykorzystywaną do transportu (drogi, linie kolejowe, drogi powietrzne, drogi wodne, kanały i terminale). Działania związane z transportem i logistyką, a także rozwój zorientowany na transport również biorą udział w tej ocenie. Na ocenę stopnia zrównoważenia transportu ma w dużej mierze wpływ nie tylko skuteczność i wydajność samego systemu transportowego, ale również jego wpływ na środowisko i klimat.

Propagowanie rozwoju transportu zrównoważonego utożsamiane bywa często obecnie z propagowaniem rozwoju konstrukcji i rozpowszechniania w użytkowaniu wspomnianych już wcześniej pojazdów o tzw. zerowej emisji gazów wydechowych (ang. *zero emission vehicle*) [C11]. Posługiwanie się taką nazwą może jednak mylić. W nazwie sformułowanej w języku angielskim nie ma zresztą wymienionego określenia, w jakim zakresie ma to być emisja zerowa i co ma się tu bilansować? W spotykanych, ogólnie dostępnych, źródłach dotyczących tej problematyki wyjaśnia się, że takie określenie (chyba tylko na początek) oznacza popieranie produkcji takich pojazdów, w których z pokładowego źródła mocy i przetwarzającego tę moc napędu nie następuje emisja na zewnątrz pojazdu zanieczyszczeń szkodliwych dla zdrowia i środowiska. Pod taką definicją rozumie się przede wszystkim cząstki stałe (np. sadza), węglowodory, dwutlenek i tlenek węgla, tlenki azotu czy ołów. Wydaje się, że baterijny samochód elektryczny doskonale wypełnia wszelkie wymagania wynikające z takiej definicji.

Ale jeśli spojrzeć na sprawę rozwoju transportu zrównoważonego postulowanego we wcześniejszym akapicie, to nasuwa się poważniejsze pytanie: czy tak prosto i w sumie naiwnie rozumiana definicja „pojazdu o zerowej emisji spalin” nie jest przypadkiem pewnego rodzaju krótkowzrocznością, a może nawet nadużyciem zaufania tych biedniejszych społeczeństw? Bo przy ciągłym powoływaniu się na tę definicję nie bierze się przecież pod uwagę wszystkiego tego złego, co towarzyszy produkcji wszelkich komponentów niezbędnych do produkcji tych „idealnych samochodów”. Nie tylko należy tu pamiętać o tych 50% energii zawartej w kopalinach (takich jak węgiel czy ropa naftowa), spalanych w elektrowniach ciepłych, ale również o szkodliwych gazach emitowanych do atmosfery oraz innych nie mniej groźnych substancjach odpadowych, zanieczyszczających środowisko w procesie produkcji ogniw elektrycznych czy paliwowych, a także magnesów trwałych lub też innych elementów wchodzących w skład napędów przekształtnikowych, takich jak silniki, moduły energoelektroniczne mocy,

kondensatory, dławiki itp. A co z dodatkowymi, trudnymi do uniknięcia w tej sytuacji zanieczyszczeniami powstającymi przy utylizacji wszelkich „przestarzałych” czy po prostu już „niechcianych” pojazdów, które zamiast być zmodernizowane i dalej użytkowane, muszą zostać zutylizowane – a do tego także przecież jest potrzebna energia. Chyba że zostaną one „podrzucone” tym biedniejszym krajom.

Bardzo możliwe, że nowe pomysły rewolucjonizujące zasilanie transportu kołowego w energię pojawią się ze strony biotechnologii. Na przykład w bilansie tzw. gazów cieplarnianych dokonywanym w skali całego globu udział wynikający z pozyskiwania energii z tzw. paliw kopalnych (węgiel i ropy naftowej) rzeczywiście powinien być szybko i skutecznie zmniejszany, bowiem do atmosfery uwalniany jest m.in. węgiel jako pierwiastek pochodzący spod ziemi, ułożony tam miliony lat temu. Ale jeśli nowe paliwa płynne w postaci węglowodorów podobnych do wydobywanej spod ziemi ropy będą otrzymywane w wyniku odpowiednio prowadzonych procesów biochemicznych na świeżych szczątkach organicznych, to istniejący w przyrodzie bilans nie zostanie zachwiany. Bowiem zawarty w nich węgiel i inne substancje trafiające do atmosfery pochodzą z aktualnego obiegu tych substancji w przyrodzie. W wyniku spalania takiego paliwa w tradycyjnych silnikach spalinowych dostaną się i tak wkrótce do środowiska tylko trochę inną drogą. Nie będzie więc potrzeby przeprowadzania na wielką skalę rewolucji w transporcie. Do tego czasu wystarczy więc, jeśli uwaga wszystkich zostanie skupiona na rozwoju napędów hybrydowych, którymi w pierwszym rzędzie powinni się teraz zajmować zarówno inżynierowie rozwiązujący rozmaite problemy technologiczne, jak i naukowcy pracujący nad opracowaniem nowych teoretycznych podstaw ich konstrukcji oraz zasad sterowania ich komponentami.

Z tego punktu widzenia wydaje się, że w nadchodzących latach wart upowszechniania jest bynajmniej nie ten całkowicie wydawałoby się „czysty” środowiskowo baterijny samochód elektryczny BEV, w pełni zależny wyłącznie od energii elektrycznej czerpanej z „gniazdka” miejskiej stacji ładującej, ale może jednak „trochę brudzący” swoimi spalinami, ale za to w sposób bardzo kontrolowany – samochód hybrydowy HEV (ang. *hybrid electric vehicle*) [A24]. Na ten trend wskazują zresztą obecne sukcesy rynkowe odnoszone przez producentów samochodów hybrydowych, osiąganie znacznie lepszych wyników sprzedaży w porównaniu z producentami samochodów elektrycznych. W literaturze poświęconej pojazdom samochodowym z napędami elektrycznymi jest przedstawianych bardzo wiele rozmaitych wariantów wykorzystania energii elektrycznej do ich napędzania [C11].

Szczegółowe omówienie rozmaitych konstrukcji samochodów elektrycznych, rozważanych od strony naukowej, w postaci wyników badań przeprowadzonych na drodze symulacji komputerowych, lub praktycznej, w postaci badań wykonanych na prototypach laboratoryjnych, podawane w publikacjach, a także opisy techniczne modeli już produkowanych i sprzedawanych przez prawie wszystkie poważne światowe koncerny samochodowe, zdecydowanie wykracza poza ramy tej książki. Dlatego na zakończenie tego podrozdziału na rysunku 2 zostały pokazane tylko trzy najważniejsze, podstawowe schematy blokowe

W napędzie o budowie mieszanej (rys. 2 c) pojawia się możliwość zachowania zalet obu wyżej omówionych struktur, a ograniczenia ich wad. Nadal wały silnika spalinowego i silnika elektrycznego poprzez blok przekładni mechanicznych pozostają połączone z głównym wałem napędowym, ale z wału korbowego silnika spalinowego napędzana jest także niewielka prądnica DC, która podobnie jak we współczesnych samochodach dobrze znany wszystkim tzw. alternator, służy wyłącznie do doładowywania akumulatora. Jak wynika z tego schematu, energia ze zbiornika paliwa może do kół pojazdu być w sposób ciągły od razu przekazywana za pośrednictwem silnika spalinowego, a na drodze elektrycznej jedynie w sposób interwencyjny – pośrednio, dopiero po uprzednim zmagazynowaniu jej w akumulatorze, czyli okresowo. Zaletą struktury mieszanej jest, że wszystkie komponenty energetyczne tego napędu pod względem swojej konstrukcji mogą mieć stosunkowo niewielkie wymiary i prostą budowę. Dotyczy to zwłaszcza możliwości zdecydowanego uproszczenia budowy bloku przekładni mechanicznych oraz obniżenia nominalnej mocy prądnicy DC, która służy tu wyłącznie do długofalowej kontroli stanu naładowania samego akumulatora. Niezbędny chwilowy wzrost mocy napędowej w stanach dynamicznych, nawet przy niezmiennym sposobie pracy silnika spalinowego, gwarantuje właśnie ten akumulator, w którym przy hamowaniu elektrodynamicznym pojazdu zwrot energii kinetycznej zapewnia elektryczny silnik napędowy pracujący jako prądnica. Struktura mieszana napędu pozwala na przeprowadzenie skutecznej i łatwej optymalizacji energetycznej, dotyczącej pracy całego napędu, oraz szybkie jego dostosowanie do zmieniających się zewnętrznych warunków towarzyszących eksploatacji samego pojazdu. Wadą tego układu natomiast jest to, że układ jest bardziej rozbudowany (bo zawiera więcej komponentów, które muszą być staranniej dobrane), a jego sterowanie również musi być bardziej przemyślane. Potencjalne korzyści ekonomiczne, eksploatacyjne i środowiskowe – związane z obniżeniem poziomu globalnych zanieczyszczeń (także tych towarzyszących produkcji takich napędów), możliwe do uzyskania dzięki zastosowaniu takiej struktury, czynią tę wersję hybrydyzacji napędów spalinowych bardzo interesującym kierunkiem rozwoju elektrycznych napędów trakcyjnych.

Jednym z ważniejszych zadań przy rozwijaniu konstrukcji napędów hybrydowych jest ciągle prowadzenie optymalizacji wzajemnej współpracy pomiędzy poszczególnymi komponentami, mogącymi wchodzić w skład takich napędów, czyli:

- silnika spalinowego i silnika elektrycznego połączonych ze sobą za pośrednictwem mechanicznego magazynu energii (masy wirującej);
- zbiornika paliwa płynnego określonego rodzaju (spalane mogą być przecież nie tylko frakcje ropy naftowej, ale wodór czy też biopaliwa – także te nowej generacji, pochodzące z fermentacyjnej przeróbki biomasy);
- statycznego magazynu energii elektrycznej, czyli tradycyjnego akumulatora (będącego obecnie najczęściej nowoczesnym ogniwiem elektrochemicznym) o możliwie jak największej pojemności, lecz niestety oferującego dostęp do tej energii o bardzo ograniczonej mocy;

- dynamicznego magazynu energii elektrycznej o małej pojemności, lecz oferującego szybki dostęp bez odczuwalnego ograniczenia mocy, będącego bądź superkondensatorem, bądź magazynem energii mechanicznej w postaci koła zamachowego oddzielonego od wału napędowego pojazdu koła (wyposażonego we własny, dodatkowy przekształtnikowy napęd elektryczny).

W wielu przypadkach nie ma potrzeby instalowania na „pokładzie” pojazdu jednocześnie kilku magazynów energii, czyli przy projektowaniu napędu hybrydowego dla danego pojazdu, z trzech podanych wyżej: jednego mechanicznego i dwóch elektrycznych, należy wybrać ten (lub te) magazyny, które w danym zastosowaniu są najbardziej przydatne. Zgodnie z taką definicją napędy elektrycznych lokomotyw spalinowych mogą być uznane za pierwsze napędy hybrydowe (ale o strukturze szeregowej), ponieważ silnik spalinowy napędza w nich jedynie prądnicę (generator pokładowej elektrowni), a napędowe koła jezdne są połączone wyłącznie z wałami silników elektrycznych, zasilanych przez tę prądnicę bezpośrednio lub za pośrednictwem przekształtników.

Zdaniem autora tej książki w najbliższych latach istniejące obecnie duże zapotrzebowanie na pojazdy kołowe z tego rodzaju napędem – użytkowane zarówno indywidualnie, jak i w miejskim transporcie zbiorowym – nie tylko będzie się utrzymywało, ale będzie nawet wzrastać. W transporcie miejskim, charakteryzującym się stałymi trasami przejazdu oraz bardzo dużą regularnością poruszania się, w grę wchodzi dodatkowo możliwość łatwego okresowego uzupełnienia zapasu energii elektrycznej (doładowania) z własnych stacji energetycznych ulokowanych na tzw. krańcówkach trasy, w czasie dłuższego postoju pojazdu – przewodowo lub bezprzewodowo. Już sam fakt, że taki pojazd ma dwa różne mobilne magazyny energii, pozwala na znaczne obniżenie poziomu emisji zanieczyszczeń, a także zapewnia wzrost dokładności w realizacji planowego rozkładu jazdy pomimo różnych zakłóceń komunikacyjnych. Ponadto, w pojeździe miejskim z napędem hybrydowym elastyczne zarządzanie dwoma zasobnikami energii używanej do poruszania pojazdu (zbiornikiem paliwa – napełnianym tylko raz, przy wyjeździe pojazdu z zajezdni, oraz akumulatorem – tylko okresowo doładowywanym na krańcówkach, w miarę potrzeby), pozwala nie tylko zwiększyć stopień niezawodności ruchu pojazdu, ale także znacząco obniżyć wielkość i ciężar tych obu używanych zasobników energii, co z pewnością przełoży się na obniżenie stałych kosztów eksploatacji takiego taboru.

Bibliografia dostępna pod linkiem: nis.com.pl/bibliografia.html

Fragment pochodzi z książki: *Elektryczny napęd trakcyjny*, Andrzej Dębowski, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2019