

Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe

www.railvehicles.eu



Analiza doboru pomocniczego układu napędowego do hybrydowego pojazdu szynowego specjalnego przeznaczenia

Patryk Urbański^{a*}, Dawid Gallas^a, Arkadiusz Stachowicz^b, Wojciech Jakuszko^a, Paweł Stobnicki^a

^a Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny, Polska

^b Zakład Pojazdów Szynowych Sp. z o.o., Polska

ARTICLE INFO

Received: 7 March 2022

Revised: 7 April 2022

Accepted: 23 April 2022

Available online: 3 May 2022

KEYWORDS

Special purpose vehicle
Alternative propulsion systems
Hybrid rail vehicle
Auxiliary drive system

Rygorystyczne normy emisji spalin sprawiają, iż wykorzystywane silniki spalinowe, implementowane do środków transportu, muszą spełniać standardy dotyczące wartości emisji związków szkodliwych. Z tego względu widoczny jest wzrost stopnia wykorzystania alternatywnych źródeł napędu, w tym również w transporcie kolejowym. W artykule przedstawione zostały niekonwencjonalne rozwiązania układów napędowych w pojazdach szynowych wykorzystujące układy hybrydowe oraz ogniwa paliwowe. Przedstawiona została również koncepcja realizowanego projektu pojazdu szynowego specjalnego przeznaczenia, który ma posiadać możliwość napędu z trzech różnych źródeł. Opisane zostały rozważania dotyczące doboru spalinowego układu napędowego, który w pojeździe ma spełniać rolę pomocniczego. Przedstawiono również możliwości zabudowy jednostki napędowej na pojeździe.

This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

1. Wstęp

Tabor kolejowy występuje w wielu formach i przeznaczony jest do licznych zadań, które często mają swój indywidualny charakter lub odbiegający od pozostałych. Te różnice powodują znaczną rozbieżność charakteru pracy tych pojazdów. Utrudnia to znacząco dobór kluczowych elementów i zespołów, które ograniczone są swoją specyfiką pracy i ograniczonymi parametrami. Głównym aspektem, definiującym w procesie projektowania nowego pojazdu jest jego układ napędowy, oraz elementy z których się składa. Tym samym kryteria doboru jednostek napędowych i ich parametrów uzależnione są od rodzaju pracy planowanej dla projektowanego pojazdu. Przykładowo, szynowy pojazd pasażerski będzie się zwykle znacząco różnił od lokomotywy towarowej lub lokomotywy manewrowej. Pojazdy specjalnego przeznaczenia wymagają często tym bardziej specyficznych i unikalnych charakterystyk i parametrów. W zależności od warunków pracy zastosowanie pojazdów szynowych z napędem elektrycznym może nie być możliwe, głównie ze względu na ograniczony poziom elektryfikacji linii kolejowych w Polsce sz-

cowany na ponad 60% [1]. W wyniku tych ograniczeń wraz z potrzebą ograniczania emisji spalin i zapotrzebowania na paliwa węglowodorowe na rynku pojazdów szynowych pojawiają się nowe rozwiązania alternatywne lub mieszane, bazujące na zasilaniu elektrycznym z trakcji przy możliwości jazdy i pracy pojazdu poza trakcją w ograniczonym zakresie czasu lub bez takich ograniczeń. Takie rozwiązania pozwalają zmniejszać zapotrzebowanie na pracę pojazdów szynowych w trybie spalinowym. Oznacza to, że możliwość wykorzystania napędu spalinowego w razie potrzeby lub nagłych wypadkach. Kolejnym rozwiązaniem jest włączenie napędów alternatywnych w większy skład celem zmniejszenia jego uciążliwości środowiskowej. Taki efekt uzyskać można stosując napęd alternatywny aktywnie w chwilach kiedy silnik spalinowy osiąga punkty pracy o niskiej sprawności lub dużej emisyjności. Innym podejściem jest zastosowanie akumulatorów lub innych układów magazynowania energii umożliwiających chwilową pracę pojazdu poza siecią elektryczną. Takie rozwiązanie nie umożliwia jednak pojazdowi pełnej niezależności od elektryfikowanych linii kolejowych. Wszystkie omawiane rozwiązania mają na celu zastąpienie ist-

niejących technologii napędowych pojazdów szynowych, które wymagają zwykle trakcji elektrycznej lub stwarzają zagrożenie zdrowotne dla osób przebywających w ich pobliżu przez emisję związków toksycznych w spalinach.

Negatywny wpływ na środowisko oraz rosnąca świadomość problemów związanych z emisją dwutlenku węgla i innych związków toksycznych, wpływających na globalne ocieplenie, powodują rozwój nowych, ekologicznych technologii we wszystkich gałęziach transportu. Wyniki tego rozwoju obserwuje się głównie na przykładzie pojazdów drogowych, ale możliwe jest zastosowanie podobnych rozwiązań w pojazdach szynowych, po odpowiednim ich dostosowaniu. Ponieważ szacowany wiek taboru kolejowego jest wysoki, zwłaszcza w Polsce gdzie wynosi około 33 lat dla lokomotyw [2] zmiany w technologii napędów tych pojazdów będą odzwierciedlać się poprzez redukcję emisji stopniowo. Oznacza to, że aby uzyskać wyraźne zmiany w emisji z pojazdów szynowych zmiany w taborze dostępnym na rynku muszą być wprowadzane odpowiednio wcześniej. Podczas gdy pojazdy zakupione na przestrzeni ostatnich dwóch dekad charakteryzowały się coraz lepszymi parametrami środowiskowymi (zgodnie z zaostżanymi wymaganiami prawnymi dotyczącymi emisji spalin) nadal będą one miały negatywny wpływ na środowisko naturalne, który będzie obecny do czasu wycofania ich z eksploatacji. Konieczność zastępowania obecnie eksploatowanych pojazdów nowoczesnym taborzem prowadzi do opracowywania nowych, mniej szkodliwych rozwiązań technologii napędów, w tym napędów pojazdów specjalnych, które omówione zostały w tym artykule.

2. Przykłady alternatywnych napędów w pojazdach szynowych

2.1. Hybrydowe napędy

Układy hybrydowe są wykorzystywane głównie w pojazdach drogowych. Elektryfikacja [3] środków transportu staje się coraz bardziej popularna ze względu na możliwość ograniczenia negatywnego wpływu na środowisko naturalne poprzez zredukowanie udziału czasu pracy silnika spalinowego. Tenden-

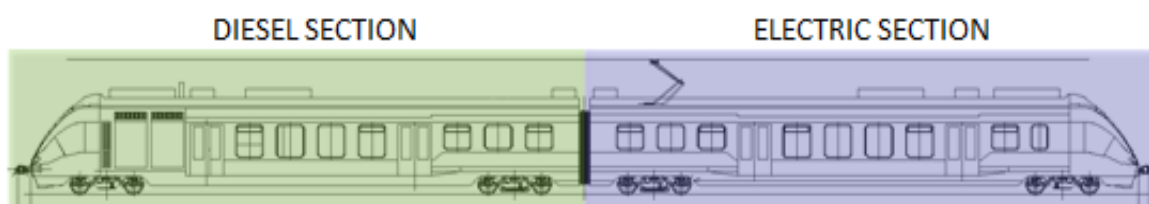
cja ta jest również widoczna w sektorze pojazdów typu non-road (pozaodrogowych) [4], a także w transporcie kolejowym [5].

Na Polskich Liniach Kolejowych zelektryfikowanych jest 62% linii, a w pięciu województwach udział ten nie przekracza 40% [6]. W przypadku krajów EU-27 średnia ta wynosi 56% [7]. Sytuacja ta sprawia, iż wykorzystanie pojazdów szynowych, zależnych wyłącznie od sieci trakcyjnej, nie jest możliwe na wszystkich odcinkach. Zasadne w tym przypadku jest wykorzystanie pojazdów posiadających własne źródło napędu jak na przykład silnik spalinowy. Jednak użycie tego rozwiązania wiąże się z lokalną emisją związków szkodliwych spalin. Rozwiązaniem łączącym zalety wykorzystania sieci trakcyjnej oraz niezależność napędu spalinowego jest pojazd szynowy z hybrydowym układem napędowym.

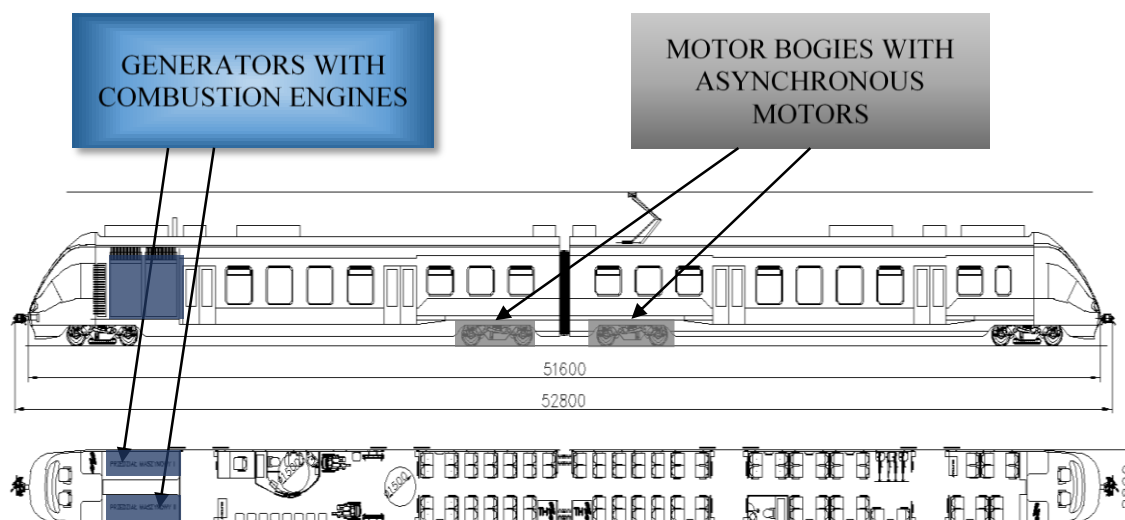
W Polsce zostały już opracowane konstrukcje pojazdów szynowych z hybrydowymi układami napędowymi. Jednym z nich jest szynobus pasażerski zaprojektowany przez SBŁ – IPS „Tabor”, a wyprodukowany przez H. Cegielski – FPS. Pojazd typu 227M jest konstrukcją składającą się z dwóch członów: spalinowego oraz elektrycznego (rys. 1 oraz rys. 2). Każdy człon jest specjalnie zaprojektowany do użycia konkretnego rodzaju napędu tj. w członie spalinowym są zabudowane dwa agregaty prądotwórcze umożliwiające jazdę w trybie spalinowym (rys. 3) [8], a w członie elektrycznym urządzenia potrzebne do poboru i przetwarzania energii elektrycznej pochodzącej z trakcji elektrycznej. W tabeli 1 przedstawione zostały parametry techniczne pojazdu 227M.

Tabela 1. Parametry techniczne pojazdu 227M

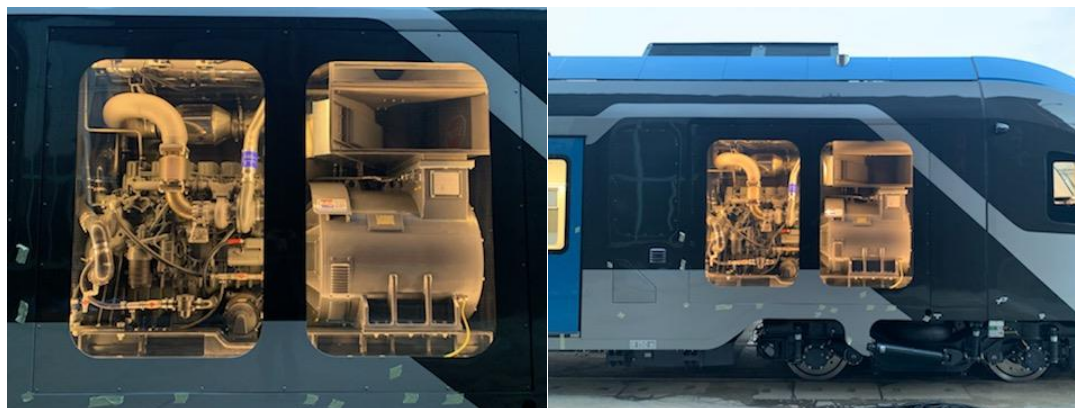
Parametr	Wartość
Długość całego zespołu ze sprzęgami	53 100 mm
Masa całego pojazdu próżnego	110 t
Masa całego pojazdu maksymalnie obciążonego (4 os./m ²)	127 t
Liczba miejsc siedzących: stałych/składanych	80/3
Liczba miejsc stojących (4 os./m ²)	145
Prędkość eksploatacyjna przy zasilaniu z trakcji elektrycznej	160 km/h
Prędkość eksploatacyjna przy zasilaniu z agregatów prądotwórczych	120 km/h
Moc silników spalinowych	2 × 400 kW@1900 obr/min
Max. moment silników spalinowych	2 × 2500 Nm@1200 obr/min
Moc silników trakcyjnych	4 × 300 kW



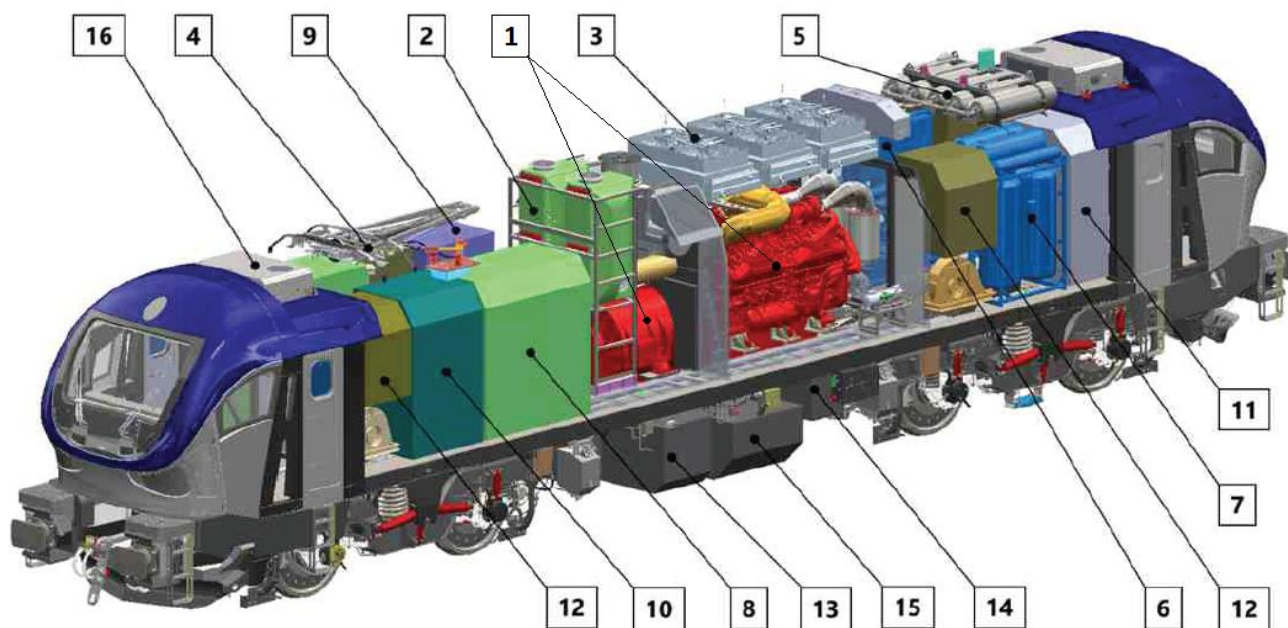
Rys. 1. Pojazd szynowy typu 227M składający się z członów: spalinowego oraz elektrycznego [28]



Rys. 2. Lokalizacja zespołów prądowców i wózków silnikowych [8]



Rys. 3. Zabudowana jednostka prądowca typu powerpack na pojeździe szynowym typu 227M [8]



Rys. 4. Rozplanowanie urządzeń na lokomotywie 111DE; 1 – agregat prądowczy, 2 – zespół układów katalitycznych SCR, 3 – zespół chłodził silnika spalinowego, 4 – pantograf, 5 – zbiorniki główne powietrza, 6 – moduł sprężarkowy, 7 – moduł tablicowy, 8 – szafa falowników trakcyjnych, 9 – kolumna chłodząca z rezystorem hamowania, 10 – szafa WN, 11 – szafa ETCS, 12 – szafa NN z wentylatorem silników trakcyjnych, 13 – dławik liniowy, 14 – skrzynia akumulatorów, 15 – zbiornik paliwa, 16 – klimatyzator [19]

Kolejnym przykładem pojazdów szynowych wykorzystujących dwa źródła napędu są lokomotywy dwunapędowe typu 111Ed (rys. 4) oraz 111DE (rys. 5) zaprojektowane przez SBL-IPS „Tabor”, a wyprodukowane przez Pojazdy Szynowe PESA Bydgoszcz S.A. [10]. Pojazdy te w zależności od typu wykorzystują dwa źródła napędu: z sieci elektrycznej oraz z agregatu prądotwórczego. Takie rozwiązanie czyni lokomotywę czteroosiową uniwersalną. Pojazd może być wykorzystywany na każdym odcinku linii kolejowej tj. zelektryfikowanym lub też nie. Dodatkowo pojazd taki jest funkcjonalny, ponieważ może wykonywać różne prace transportowe w ruchu towarowym i pasażerskim oraz prace manewrowe, gdzie linie nie są zelektryfikowane. Tego typu pojazdy są dedykowane szczególnie przewoźnikom zajmującym się transportem intermodalnym, oraz przewozami rozproszonymi towarów [19].



Rys. 5. Lokomotywa [12]

2.2. Ogniwa paliwowe

Wodór jest jedną z bardziej przyszłościowych form pozyskiwania energii. Jego wykorzystanie jest rozwiązaniem przyjaznym środowisku ze względu na prawie zeroemisyjność. W przeciwieństwie do spalania paliw węglowodorowych, gdzie produktem spalania, oprócz pary wodnej i ciepła spalania są także związki szkodliwe jak: CO_2 , CO, HC, NO_x oraz cząstki stałe (PM) [13, 14], wynikiem spalania wodoru jest praktycznie tylko para wodna [15, 16] oraz przy spalaniu wysokotemperaturowym NO_x . Wodór można również wykorzystać w ogniach paliwowych, tzw. Fuel Cell Hydrogen (FCH) [17, 18]. W tym przypadku efektem reakcji chemicznej jest para wodna oraz energia elektryczna, która zostaje następnie wykorzystana do napędu silników elektrycznych [19]. Docelowo wodór jest upatrywany do tego typu rozwiązań. Według szacowań zastąpienie pociągów z silnikami o zapłonie samoczynnym, kursujących na odcinku Gdynia-Hel-Gdynia, pociągami napędzanymi ogniwami paliwowymi na wodór z odnawialnych źródeł energii

mogłoby ograniczyć roczną emisję CO_2 o 2505 ton [20].

W transporcie kolejowym zastosowanie ogniwa paliwowych ma już miejsce [21, 22]. Jednym z bardziej rozpoznawalnych wdrożeń ogniwa wodorowych do pojazdów szynowych jest pojazd Coradia iLint firmy Alstom (rys. 6). Pociąg został wykorzystany komercyjnie po raz pierwszy we wrześniu 2018 roku. Jednocześnie pojazdy te zastąpiły wykorzystywane do tej pory pojazdy spalinowe na 100 km trasie biegnącej przez Cuxhaven, Bremerhaven, Bremervörde i Buxtehude w Dolnej Saksonii w Niemczech [23]. Dane pojazdu Coradia iLint przedstawiono w tabeli 2.



Rys. 6. Pociąg Coradia iLint [6]

Tabela 2. Parametry pojazdu Coradia iLint [9]

Parametr	Wartość
Max prędkość	140 km/h
Zasięg na pełnym zbiorniku	1000 km
Masa użytkowa dla 1 członu	49 t
Pojemność zbiorników na wodór	94 kg

W Polsce projektem dotyczącym napędu wodorowego dla pojazdów szynowych podjął się Bydgoski producent pojazdów szynowych PESA [24]. Aktualnie trwają prace nad lokomotywą manewrową napędzaną wodorem, a dokładniej modernizacją i dostosowaniem do tego rodzaju napędu lokomotywy SM42. Lokomotywa po zakończonych pracach ma otrzymać oznaczenie SM42 6Dn (rys. 7). Podstawowe dane dotyczące pojazdu przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Parametry pracy lokomotywy manewrowej SM42 6Dn zasilanej wodorem [9]

Parametr	Wartość
Max. prędkość	90 km/h
Masa użytkowa	< 70 t
Moc FCH	85 kW × 2
Spodziewane zużycie paliwa	< 0.08 kg/kWh
Zasilanie napięciem prądu DC	< 800 V
Pośrednia pojemność baterii	> 160 kWh
Pojemność zbiorników na wodór	175 kg
Temperatura użytkowa ogniwa paliwowego	-40°C to +85°C

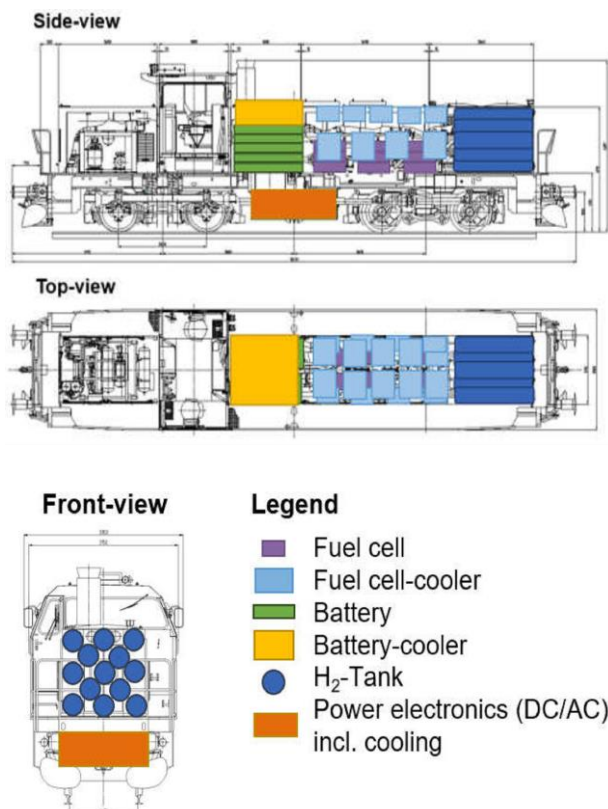


Rys. 7. Wodorowa lokomotywa SM42 6Dn zaprezentowana na Międzynarodowych Targach Kolejowych TRAKO 2021 oraz wodorowe ogniwa paliwowe napędzające lokomotywę SM42 6Dn produkcji PESA Bydgoszcz [9]

Projekty dotyczące wykorzystania ogniw paliwowych w lokomotywach manewrowych pojawiły się również za granicą. Przykładem jest koncepcyjny projekt przebudowy spalinowej lokomotywy manewrowej MaK G1206 na lokomotywę z FCH (rys. 8). Pomysłodawcy projektu obliczyli wymagane parametry dotyczące układu napędowego oraz zasobnika energii w skład którego wchodzi takie komponenty jak baterijny zasobnik energii, system ogniw paliwowych, układ chłodzenia zarówno dla baterii jak i ogniw paliwowych oraz zbiornik przeznaczony na wodór. W pracy przedstawiono również obliczenia dotyczące zapotrzebowania energetycznego oraz dane dotyczące komponentów dla omawianego układu napędowego zapewniającego wykonanie trzech ciężkich prac manewrowych (tab. 4). Masa całego systemu wyniosła 9900 kg oraz całkowita objętość to 16,5 dm³ [15].

Tabela 4. Komponenty dla najbardziej wymagających zastosowań (3× ciężkie prace manewrowe) [15]

Komponent	Rozwiązanie	Ilość	Rozmiar instalacji
Ogniwo paliwowe	Hydrogenics HD 30	18	540 kW
Chłodzenie ogniwa paliwowego	AKG W40	18	780 kW
Akumulator	Akasol 18 AKM 46	10	368 kWh
Chłodzenie akumulatora	Technotrans zeta.line 450	1	45 kW
Zbiornik wodoru	Luxfer W320H	13	100 kg

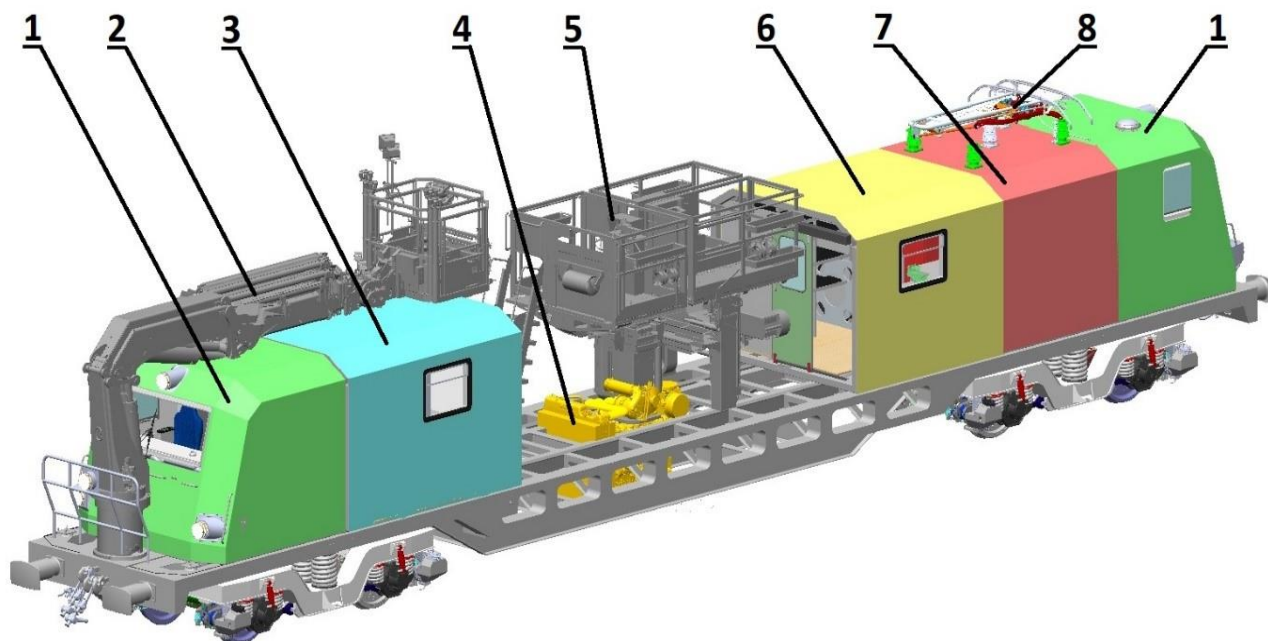


Rys. 8. Rozmieszczenie komponentów na lokomotywie MaK G1206 [15]

3. Pojazd szynowy specjalnego przeznaczenia

Rozwój zrównoważonego transportu w Polsce odgrywa istotną rolę w kwestii ochrony środowiska. W związku z powyższym Zakład Pojazdów Szynowych (ZPS) ze Stargardu wspólnie z Łukasiewicz – Instytut Pojazdów Szynowych „Tabor” (obecnie Poznański Instytut Technologiczny, Centrum Pojazdów Szynowych) realizują projekt w ramach Szybkiej Ścieżki pn. „Innowacyjny, specjalny pojazd kolejowy z napędem hybrydowym udoskonalony o zasilanie z zasobników energii, będący bazą do montażu urządzeń przeznaczonych do budowy, diagnostyki i pomiarów infrastruktury kolejowej”, projekt nr POIR.01.01.01-00-1601/20 dotyczący budowy nowego, innowacyjnego, specjalnego pojazdu kolejowego z hybrydowym systemem napędowym typu 501EH. Pojazd ma być wyposażony w takie elementy jak wysięgnik koszowy, platforma koszowa, przedział warsztatowy oraz przedział socjalny (rys. 9). Najważniejszymi wyzwaniem dotyczącymi pojazdu specjalnego przeznaczenia przyjaznego środowisku są między innymi:

- zaprojektowanie wózków napędowych pojazdu przystosowanych do prędkości 160 km/h,
- hybrydowy układ napędowy,
- zaimplementowanie nowych, przyjaznych środowisku systemów przetwarzania i magazynowania energii elektrycznej tj. baterijny zasobnik energii,
- redukcja emisji związków szkodliwych spalin,



Rys. 9. Wstępna koncepcja zabudowy pojazdu specjalnego przeznaczenia typu 501EH; 1 – kabina maszynisty, 2 – wysięgnik koszowy, 3 – przedział socjalny, 4 – silnik spalinowy, 5 – platforma koszowa, 6 – przedział warsztatowy, 7 – moduł elektryczny, 8 – pantograf

– nowoczesny i intuicyjny interfejs maszynisty.

Jednym z bardziej interesujących rozwiązań w projekcie jest hybrydowy układ napędowy. Docelowo w konwencjonalnych warunkach przejazdowych, tj. przejazd na odcinkach zelektryfikowanych, pojazd ma pozyskiwać energię elektryczną z sieci trakcyjnej poprzez odbierak prądu. Po przyjeździe na miejsce pracy pojazd ma być zdolny do pracy przy wykorzystaniu zasilania z zasobników energii. Dobór zasobników energii o wymaganych parametrach użytkowych nastąpi w dalszych etapach projektu, jednak wydaje się uzasadnione zastosowanie np. baterii akumulatorów lub superkondensatorów. Wspomniane rozwiązania pozwoliłyby również na zastosowanie systemu odzysku energii z procesu hamowania. Zwiększyłoby to sprawność energetyczną użytkowanego pojazdu. Podczas hamowania, wytworzona energia elektryczna trafiałaby do zasobników energii, a w przypadku jej nadmiaru energia trafiałaby do sieci trakcyjnej.

Pojazdy taboru technicznego zasilane są wyłącznie silnikami spalinowymi o zapłonie samoczynnym (ZS). Wykorzystanie tego typu pojazdu podczas robót stacyjnych sprawia, że emisja związków toksycznych takich jak HC, CO, NO_x oraz cząstki stałe (PM), pochodząca ze spalania paliw węglowodorowych zwiększa ryzyko pogorszenia zdrowia pracowników oraz oddziałuje niekorzystnie na środowisko. Z tego powodu pojazd opisywany w artykule zostanie wyposażony w silnik spalinowy, którego głównym zadaniem będzie praca w sytuacjach awaryjnych tj. zanik zasilania podstawowego (trakcja elektryczna i zasobnik

energii). Silnik podczas wystąpienia awarii będzie pracował wraz z prądnicą jako agregat prądotwórczy.

Podczas procesu projektowego jednym z etapów jest dobór odpowiedniej spalinowej jednostki napędowej. W niniejszym artykule przedstawiono jedynie wstępne rozważania doboru silników, oparte na wykorzystanych jednostkach napędowych w poprzednich projektach. Rzeczywiste jednostki napędowe zostaną wyłonione w późniejszym etapie przetargowym. Ze względu na dotychczasowe doświadczenie firmy ZPS, w artykule rozważaniom poddane zostały jednostki napędowe wykorzystywane w pojazdach zaprojektowanych w przeszłości. Ze względu między innymi na charakter pracy pojazdu, jego masę, dostępną przestrzeń do zabudowy oraz zapotrzebowanie pojazdu na moc podczas pracy w trybie spalinowym - oparte na doświadczeniu producenta taboru, które zostało zebrane podczas realizacji poprzednich projektów - pod uwagę zostały wzięte dwa silniki spalinowe amerykańskiego producenta Caterpillar. Dokładniej, były to silniki C9.3B oraz C13B. Budowa silników jest do siebie zbliżona, oba są czterokusowymi, rzędowymi sześciocyndrowymi jednostkami. Różnica wynika przede wszystkim z objętości skokowej, a co za tym idzie osiągniętych (tab. 5). Najważniejsze różnice to osiągnięta moc i moment obrotowy. Silnik C9.3B osiąga 340 kW mocy maksymalnej i moment obrotowy 2088 Nm, z kolei większa o 3,2 dm³ jednostka C13B osiąga moc 430 kW i moment obrotowy 2640 Nm.

Tabela 5. Parametry silników CAT C9.3B oraz CAT C13B [2]

Parametr	C9.3B	C13B	Jednostka
Układ silnika	6-cylindrowy rzędowy silnik 4-suwowy	6-cylindrowy rzędowy silnik 4-suwowy	[-]
Średnica cylindra	115	130	[mm]
Skok tłoka	149	157	[mm]
Objętość skokowa	9.3	12.5	[dm ³]
Rodzaj doładowania	Turbodoładowany z chłodzeniem powietrza doład.	Turbodoładowany z chłodzeniem powietrza doładow.	[-]
Moc silnika	340@2000	430@1800–2100	[kW@obr/min]
Moment obrotowy	2088@1400	2640@1400	[Nm@obr/min]
Stopień sprężania	17	15.8	[-]
Typ paliwa	Diesel	Diesel	[-]
Zapłon	Samoczynny	Samoczynny	[-]
Max wysokość pracy n.p.m.	2240	2037	[m]
Zasilanie	Wtrysk bezpośredni	Wtrysk bezpośredni	[-]
Układ turbodoładowania	Pojedynczy	Pojedynczy	[-]
Liczba turbosprężarek	1	1	[-]
Norma emisji spalin	Stage V/Tier 4	Stage V/Tier 4	[-]

Różnica w objętości skokowej pomiędzy jednostkami ma przełożenie również na wymiary silników oraz ich masę. Silnik C13B jest zdecydowanie większy i o 260 kg cięższy niż C9.3B (tab. 6). Należy pamiętać, że silnik spalinowy wymaga również układu chłodzenia, smarowania i oczyszczania spalin. Im większa jednostka, tym wymagane są układy poboczne o większej wydajności i większych wymiarach.

W przypadku pojazdów Non-Road Mobile Machinery (NRMM), do których wliczają się również pojazdy szynowe, najnowsza norma emisji spalin obowiązująca w Europie to Stage V [27]. Omawiane silniki zaliczają się do non-road engine (NRE), które są dedykowane do pojazdów NRMM. W procesie certyfikacyjnym jednostki te są zobowiązane do pozytywnego przejścia testów emisji spalin Non-Road Stationary Cycle (NRSC) oraz Non-Road Transient Cycle

(NRTC), a emisja jednostkowa dla odpowiedniego związku szkodliwego nie może przekroczyć wyznaczonego limitu. Silniki te osiągają moc maksymalną o wartości kolejno 340 kW oraz 430 kW, co oznacza, że zaliczają się do kategorii NRE-v/c-6. Dopuszczalna wartość emisji dla silników spełniających normę Stage V została przedstawiona w tabeli 7.

Tabela 6. Wymiary silników CAT C9.3B oraz CAT C13B [2]

Parametr	C9.3B	C13B	Unit
Wysokość	1068	1134	[mm]
Długość	1125	1274	[mm]
Szerokość	791	994	[mm]
Masa netto suchego silnika – silnik bez opcjonalnego osprzętu	865	1125	[kg]

Spełnienie coraz bardziej wymagających norm emisji spalin wymaga zastosowania układów oczyszczania spalin (ATS). W celu spełnienia najnowszej normy emisji spalin dla opisywanych silników – Stage V – niezbędne jest zastosowanie złożonego układu wylotowego składającego się z systemu reaktorów katalitycznych oraz filtrów cząstek stałych. Dla obu silników zastosowano następujące elementy:

- reaktor utleniający (DOC), który ma na celu redukcję emisji wybranych związków toksycznych poprzez ich utlenienie. Związki na jakie oddziałuje to: $\text{HC} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$, $\text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$ oraz $\text{NO} \rightarrow \text{NO}_2$,
- filtr cząstek stałych (DPF), który ma na celu redukcję emisji cząstek stałych (PM) poprzez ich utlenienie,
- reaktor selektywnej redukcji katalitycznej (SCR), który poprzez wtrysk 32,5% roztworu mocznika redukuje emisję NO_x [18].

Zastosowanie rozwiniętego systemu układów oczyszczania spalin znacząco zwiększa przestrzeń potrzebną do zabudowy na pojeździe. W tabeli 8 zostały przedstawione wymiary układów oczyszczania spalin silników CAT C9.3B oraz C13B.

Tabela 7. Norma emisji spalin Stage V dla silników do zastosowania pozadrogowego typu non-road engines (NRE) [13]

Category	Ign.	Net Power	Date	CO	HC	NOx	PM	PN
		kW						
g/kWh								
NRE-v/c-1	CI	$P < 8$	2019	8.00	7.50 ^{a,c}		0.40 ^b	-
NRE-v/c-2	CI	$8 \leq P < 19$	2019	6.60	7.50 ^{a,c}		0.40	-
NRE-v/c-3	CI	$19 \leq P < 37$	2019	5.00	4.70 ^{a,c}		0.015	1×10^{12}
NRE-v/c-4	CI	$37 \leq P < 56$	2019	5.00	4.70 ^{a,c}		0.015	1×10^{12}
NRE-v/c-5	All	$56 \leq P < 130$	2020	5.00	0.19 ^c	0.40	0.015	1×10^{12}
NRE-v/c-6	All	$130 \leq P \leq 560$	2019	3.50	0.19 ^c	0.40	0.015	1×10^{12}
NRE-v/c-7	All	$P > 560$	2019	3.50	0.19 ^d	3.50	0.045	-

^a HC+NOx

^b 0.60 for hand-startable, air-cooled direct injection engines

^c A = 1.10 for gas engines

^d A = 6.00 for gas engines

Tabela 8. Wymiary układów oczyszczania spalin CAT C9.3B oraz CAT C13B [2]

Parametr	C9.3B	C13B	Jednostka
Układ	DOC + DPF + SCR	DOC + DPF + SCR	[-]
Wysokość	432	460	[mm]
Długość	925	896	[mm]
Szerokość	694	807	[mm]
Masa	96	100	[kg]

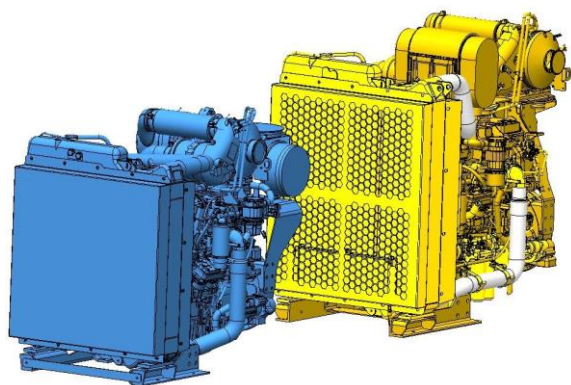
Jednostka napędowa z systemami wspomnianymi powyżej wymaga odpowiedniej przestrzeni do zabudowy na pojeździe. Z tego powodu dobór odpowiedniej jednostki jest istotną częścią projektu ze względu na możliwości zabudowy pozostałych układów i systemów znajdujących się na pojeździe szynowym. Z drugiej strony silnik powinien posiadać moc pozwalającą na płynną pracę. Na rysunku 10 przedstawiono porównanie silników CAT C9.3B oraz C13B, a na rys. 11 ich wymiary wraz ze wszystkimi układami.

Pojazd specjalnego przeznaczenia docelowo ma być wyposażony w urządzenia przeznaczone do robót naprawczych. Z tego względu przestrzeń na zabudowę, przedziałów na ostoje pojazdu jest mocno ograniczona. Dotyczy to również zabudowy silnika spalinowego ze wszystkimi układami oraz prądnicy. Jednym z rozwiązań zabudowania agregatu prądotwórczego stosowanego już w innych wersjach pojazdów jest wykorzystanie przestrzeni w konstrukcji ostoje. Zabudowa tego typu pozwala na wykorzystanie nieużytkowanej przestrzeni, wpływa na obniżenie środka ciężkości pojazdu oraz pozwala na ergonomiczną zabudowę elementów, urządzeń i przedziałów na

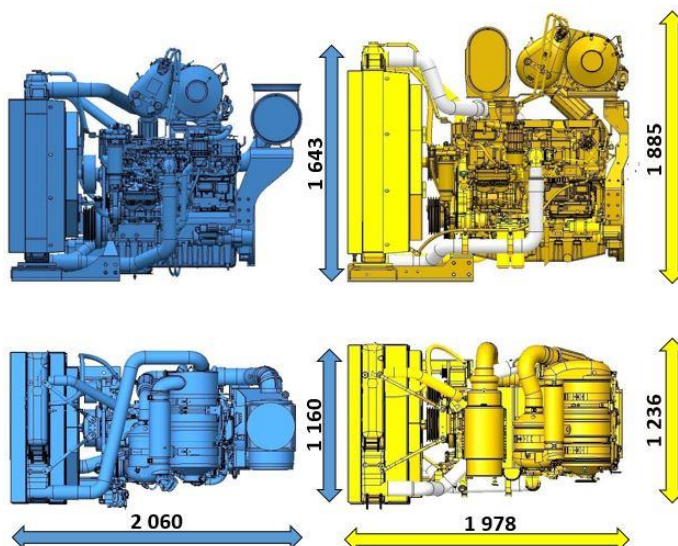
ostoi. Oznacza to również, że takie rozwiązanie znacząco zwiększy dostępną przestrzeń dla zabudowy układów podstawowego źródła napędu tj. trakcja elektryczna oraz zasobniki energii, w tym również szafy elektryczne np. szafa wysokiego napięcia, gdzie dostęp będzie bardziej przystępny. Należy również mieć na uwadze, iż opisywany pojazd będzie wykorzystywał silnik spalinowy jedynie w przypadkach awaryjnych, co oznacza, że jego użytkowanie będzie okazyjne. Przykład wspomnianego rozwiązania konstrukcyjnego na innym pojeździe przedstawiono na rys. 12.

4. Podsumowanie

Przedstawiona teoretyczna analiza doboru jednostki napędowej w pojeździe specjalnego przeznaczenia z hybrydowym układem napędowym typu 501EH uwarunkowana była wieloma parametrami. Jednym z ważniejszych były parametry pracy silnika, tj. jego charakterystyka, moc i moment obrotowy, a także parametry i warunki pracy samego pojazdu na podstawie jego planowanych zastosowań, w tym ergonomia, niezawodność i stabilność. Z powodu ograniczeń przestrzennych związanych z większym silnikiem o większej mocy, który wymaga większych i wydajniejszych zespołów i podzespołów dodatkowych, w tym układu oczyszczania spalin, konieczne było zastosowanie w przedstawionej analizie, nowoczesnych metod projektowania i produkcji, oraz nowoczesnych materiałów i technologii.



Rys. 10. Zestawienie proponowanych do zabudowy silników spalinowych do pojazdu 501EH. Kolor niebieski silnik CAT C9.3B, kolor żółty CAT C13B



Rys. 11. Zestawienie proponowanych do zabudowy silników spalinowych do pojazdu 501EH wraz z wymiarami. Na górze widok z boku, na dole widok z góry. Kolor niebieski silnik CAT C9.3B, kolor żółty CAT C13B



Rys. 12. Przykład zabudowy silnika CAT na ostoje pojazdu szynowego specjalnego przeznaczenia innego typu

Należy zaznaczyć, że silnik spalinowy w omawianej koncepcji pojazdu pełni rolę zasilania zapasowego lub awaryjnego, przez co nie planuje się jego szerokiego wykorzystania. Stąd, aspekty takie jak niezawodność i sprawność jednostki napędowej uwzględniano do oceny w ograniczonym zakresie. Dzięki zmianom w projekcie napędu hybrydowego przewidziano osiągnięcie wymiernych zysków środowisko-

wych, takich jak mniejsza emisja spalin i niższa szkodliwość. W rezultacie możliwe było uniknięcie bardziej inwazyjnych zmian oraz nadmiernej komplikacji układu napędowego, co może ułatwić serwisowanie i utrzymanie pojazdu. W zależności od wymagań stawianych przez nabywców takich pojazdów wykorzystane rozwiązania mogą ulec zmianie.



Republic
of Poland



The National Centre
for Research and Development

European Union
European Regional
Development Fund



Skróty

ATS	układ oczyszczania spalin
CO	tlenek węgla
CO ₂	dwutlenek węgla
DOC	katalityczny reaktor utleniający
DPF	filtr cząstek stałych
FCH	wodorowe ogniwo paliwowe
H ₂	wodór
H ₂ O	woda
HC	węglowodory

NO _x	tlenki azotu
NRE	silnik do zastosowania pozadrogowego
NRMM	pojazdy do zastosowania pozadrogowego
NRSC	stacjonarny cykl pozadrogowy
NRTC	jezdny cykl pozadrogowy
PM	cząstki stałe
SCR	selektywna redukcja katalityczna
TA	chłodzone turbodoładowanie

Bibliografia

- [1] Bartczak K. Analiza taboru kolejowego w Polsce. *TTS Technika Transportu Szynowego*. 2015, **22**.
- [2] Caterpillar materials.
- [3] Czerwiński J., Marciniak Z. Modułowe konstrukcje jedno- i dwukabinowych lokomotyw elektrycznych i spalinowych. *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe*. 2014, **1**, 1-10. <https://doi.org/10.53502/RAIL-138806>
- [4] Daszkiewicz P., Rymaniak Ł., Medwid M. et al. Assessment of toxic compounds emission of rail-road tractor during works on tracks. *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe*. 2018, **4**, 1-8. <https://doi.org/10.53502/RAIL-138518>
- [5] Doyle D., Harris A., Chege S. et al. Hydrogen fuel cell buses: modelling and analysing suitability from an operational and environmental perspective. *SAE Technical Paper* 2020-01-1172. <https://doi.org/10.4271/2020-01-1172>
- [6] Durzyński Z. Hydrogen-powered drives of the rail vehicles (part 1). *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe*. 2021, **2**, 29-40. <https://doi.org/10.53502/RAIL-139980>

- [7] Durzyński Z. Hydrogen-powered drives of the rail vehicles (part 2). *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe*. 2021, **3**, 1-11. <https://doi.org/10.53502/RAIL-142694>
- [8] Far M., Gallas D., Urbański P. et al. Modern combustion-electric PowerPack drive system design solutions for a hybrid two-unit rail vehicle. *Combustion Engines*. 2021. <https://doi.org/10.19206/CE-144724>
- [9] Gallas D., Stobnicki P. Adoption of modern hydrogen technologies in rail transport. *Journal of Ecological Engineering*. 2022, **23**(3) 84-91. <https://doi.org/10.12911/22998993/145291>
- [10] Internet website: European Commission: „Mobility and Transport”, 2016. <https://ec.europa.eu> (accessed on 14.02.2022).
- [11] Internet website: Electrified rail network in Europe, by country. <https://www.statista.com> (accessed on 11.02.2022).
- [12] Internet website: Pesa walczy o kontrakt na lokomotywy. <https://bydgoszcz.wyborcza.pl> (accessed on 15.02.2022).
- [13] Internet website: Emission Standards, EU: Nonroad Engines. <https://dieselnet.com> (accessed on 18.02.2022).
- [14] Kalociński T. Modern trends in development of alternative powertrain systems for non-road machinery. *Combustion Engines*. 2022, **188**(1), 42-54. <https://doi.org/10.19206/CE-141358>
- [15] Konrad M., Jäger V., Pagenkopf J. et al. Concept and design of a shunting locomotive equipped with a hybridized fuel cell hydrogen powertrain. *2021 Sixteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*. 2021, 1-5. <https://doi.org/10.1109/EVER52347.2021.9456623>
- [16] Madovi O., Hoffrichter A., Little N. et al. Feasibility of hydrogen fuel cell technology for railway intercity services: a case study for the Piedmont in North Carolina. *Railway Engineering Science*. 2021, **29**(3), 258-270. <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00249-8>
- [17] Merksiz J., Rymaniak Ł., Lijewski P. et al. Tests of ecological indicators of two-way vehicles meeting Stage IIIB and Stage IV standards in real operating conditions. *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe*. 2020, **1**, 1-9. <https://doi.org/10.53502/RAIL-138495>
- [18] Merksiz J., Siedlecki M., Ziółkowski A. et al. Methods of reducing emission from HDV Euro VI engines. *Combustion Engines*. 2015, **162**(3), 480-486.
- [19] Michalak P., Jakuszko W. Innowacyjna uniwersalna lokomotywa dwunapędowa. *Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie. Seria: Materiały Konferencyjne*. 2019, **2**(119), 149-158.
- [20] Michalak P., Merksiz J., Stawecki W. et al. The selection of the engine unit – main engine generator during the modernization of the 19D/TEM2 locomotive. *Combustion Engines*. 2020, **182**(3), 38-46. <https://doi.org/10.19206/CE-2020-307>
- [21] Muelaner J.E. Unsettled issues in electrical demand for automotive electrification pathways. *SAE Research Report* EPR2021004, 2021. <https://doi.org/10.4271/EPR2021004>
- [22] Oldknow K., Mulligan K., McTaggart-Cowan G. The trajectory of hybrid and hydrogen technologies in North American heavy haul operations. *Railway Engineering Science*. 2021, **29**(3), 233-247. <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00242-1>
- [23] Orczyk M., Gis W., Tomaszewski F. Circumstances of railway transport hydrogenization in Poland. *SAE Technical Paper* 2020-01-2131, 2020. <https://doi.org/10.4271/2020-01-2131>
- [24] Pertl P., Aggarwal M., Trattner A. et al. Development of hydrogen powered fuel cell e-snowmobiles. *SAE Technical Paper* 2019-32-0555, 2019.
- [25] Rasiński T., Michnej M. Application of hybrid drives in diesel locomotives. *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe*. 2019, **1**, 18-25. <https://doi.org/10.53502/RAIL-138503>
- [26] Shadidi B., Najafi G., Yusaf T. A review of hydrogen as a fuel in internal combustion engines. *Energies*. 2021, **14**(19), 6209. <https://doi.org/10.3390/en14196209>
- [27] Sun Y., Anwar M., Hassan N.M.S. et al. A review of hydrogen technologies and engineering solutions for railway vehicle design and operations. *Railway Engineering Science*. 2021, **29**(3), 212-232. <https://doi.org/10.1007/s40534-021-00257-8>
- [28] Urbański P., Gallas D., Kołodziejek D. et al. Passive safety features of a type 227M rail vehicle. *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe*. 2021, **4**, 25-36. <https://doi.org/10.53502/RAIL-144978>