

## Sterowanie obwodem głównym hybrydowego pojazdu szynowego

**Streszczenie.** Artykuł omawia koncepcję obwodu głównego dla pojazdu szynowego zasilanego z trzech niezależnych źródeł energii – zespołu prądotwórczego, trakcji elektrycznej oraz bateryjnego zasobnika energii. Przedstawione zostały szczegółowo poszczególne tryby pracy pojazdu, z uwzględnieniem sposobu sterowania poszczególnymi komponentami obwodu w celu maksymalizacji możliwości odzysku i magazynowania energii w zasobniku bateryjnym.

**Abstract.** The article discusses the concept of the main circuit for a rail vehicle powered by three independent energy sources - generator set, electric traction and battery energy storage. The various modes of operation of the vehicle are presented in detail, taking into account the method of controlling the individual components of the circuit in order to maximize the possibility of energy recovery and storage in the battery energy storage. (**Control of the main circuit of a hybrid rail vehicle**).

**Słowa kluczowe:** napęd hybrydowy, pojazd szynowy, obwód główny, system sterowania.

**Keywords:** hybrid drive, rail vehicle, main circuit, control system.

### Wstęp

Eksploatowane obecnie szynowe pojazdy pomocnicze, wchodzące w skład taboru technicznego, zasilane są w przeważającej większości z użyciem silników wysokoprężnych. Umożliwia to bezproblemową eksploatację takich pojazdów w przypadku awarii lub braku sieci trakcyjnej. Niekorzystnymi zjawiskami, wynikającymi z takiego sposobu zasilania, są emitowane do atmosfery zanieczyszczenia oraz hałas. Obecnie zaobserwować możemy ogólnoswiatowy trend do znacznej redukcji emisji gazów cieplarnianych. Jest to zauważalne szczególnie na rynku samochodów osobowych, wyznaczając również kierunek rozwoju układów napędowych w najbliższych latach.

Jednocześnie, są coraz powszechniej opracowywane rozwiązania szynowych pojazdów dwunapędowych, umożliwiających pracę z wykorzystaniem sieci trakcyjnej (elektryczny tryb pracy) lub pełnowymiarowego zespołu prądotwórczego z silnikiem spalinowym (spalinowy tryb pracy) [1]. Umożliwia to wykorzystanie jednego pojazdu trakcyjnego dla prowadzenia pociągu na liniach częściowo zelektryfikowanych, bez konieczności jego zmiany przy zmianie sposobu trakcji.

W celu redukcji zanieczyszczeń, opracowana została koncepcja innowacyjnego, hybrydowego pojazdu kolejowego, mającego stanowić bazę do zabudowy różnego rodzaju urządzeń przeznaczonych do budowy, diagnostyki i pomiarów infrastruktury kolejowej [2].

Innowacją jest zastosowanie, dla pojazdu szynowego tego typu, trzech niezależnych źródeł zasilania dla pojazdu. Jest to elektryczna sieć trakcyjna, baterijny zasobnik energii oraz zespół prądotwórczy z silnikiem spalinowym. Przy czym zespół prądotwórczy stanowić będzie wyłącznie awaryjne źródło zasilania dla pojazdu, wyłącznie w przypadku braku lub uszkodzenia sieci trakcyjnej oraz wyczerpania energii w bateryjnym zasobniku energii.

Baterijny zasobnik energii wykorzystywany będzie również jako źródło zasilania na postoju pojazdu do zasilania urządzeń pomocniczych, podczas prowadzenia prac przy infrastrukturze kolejowej. Zmniejszy to znacząco negatywny wpływ prowadzenia takich prac na środowisko, poprzez brak emisji zanieczyszczeń i znaczne ograniczenie hałasu, emitowanego przez pojazd.

Opracowana koncepcja pojazdu zakłada możliwość jazdy z prędkością do 160 km/h, przy zastosowaniu zasilania z sieci trakcyjnej. Ma to umożliwiać szybki dojazd

do miejsca wykonywania prac na liniach zelektryfikowanych. Zakłada się także możliwość zasilania pojazdu z sieci trakcyjnej o różnych napięciach pracy (3 kV DC, 15 oraz 25 kV AC). Budowa pojazdu jest modułowa, umożliwiając zabudowę różnych modułów zasilania z sieci trakcyjnej. Pozwala to na łatwą rekonfigurację i budowę różnych wersji pojazdów z różnym wyposażeniem, w tym z indywidualnymi źródłami zasilania, w zależności od potrzeb.



Rys.1. Wizualizacja hybrydowego szynowego pojazdu pomocniczego

### Koncepcja obwodu głównego pojazdu

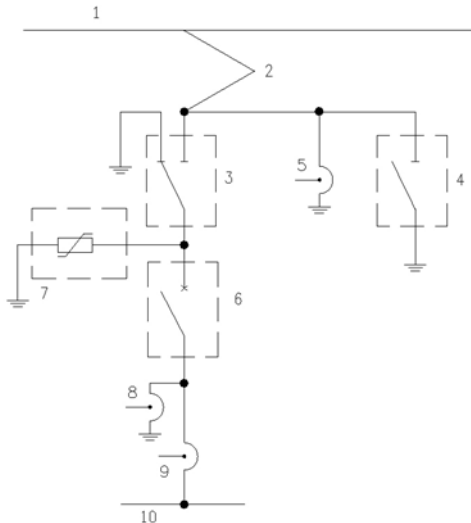
Ze względu na założoną modułową budowę obwodu głównego pojazdu, zdecydowano się na zastosowanie głównej szyny zasilającej (DC link) o napięciu odpowiadającym napięciu sieci trakcyjnej w Polsce, czyli 3 kV DC. Wszystkie obwody zasilania pojazdu i odbiorniki zostaną podłączone do tej wspólnej magistrali, za pomocą niezbędnych styczników, służących do sterowania poszczególnymi obwodami.

### Moduły zasilania pojazdu

Obwód zasilania z sieci trakcyjnej 3 kV jest standardowym obwodem stosowanym w wielu pojazdach szynowych.

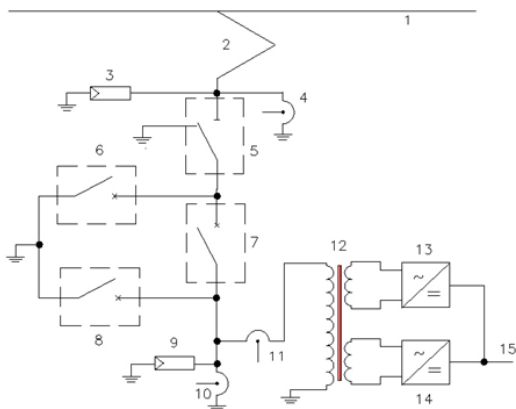
Odbierak pojazdu (2) zasilany jest z sieci trakcyjnej 3 kV DC (1). Pomiar napięcia w linii napowietrznej realizowany jest przez przekładnik napięcia (5). Obwód może uzemić

sieć trakcyjną poprzez uziemiacz sieciowy (4). Odbierak można odłączyć za pomocą zintegrowanego odłącznika lub uziemiacza (3), który zapewnia rozładowanie systemu ochrony przeciwprzepięciowej (kondensator + ogranicznik przepięć) (7). Wyłącznik szybki pojazdu (6) umożliwia wyłączenie prądów zwarciovych i oddzielenie obwodu od głównej szyny zasilającej pojazdu (10). Przekładniki napięciowe (8) i prądowe (9) dodatkowo zapewniają ciągłe monitorowanie parametrów napięciowych i prądowych sieci trakcyjnej. Obwód ten umożliwia również odzyskiwanie energii poprzez zwracanie jej do sieci trakcyjnej.



Rys.2. Schemat blokowy układu zasilania z sieci trakcyjnej 3 kV DC

Ze względu na możliwość wykorzystania pojazdu również z innymi systemami zasilania, opracowany został również obwód zasilania dla sieci trakcyjnej prądu przemiennego.



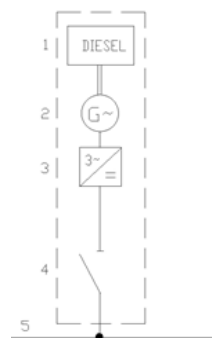
Rys.3. Schemat blokowy układu zasilania z sieci trakcyjnej 15 kV AC lub 25 kV AC

Odbierak pojazdu (2) zasilany jest z sieci trakcyjnej 15 lub 25 kV AC (1). Pomiar napięcia w linii napowietrznej realizowany jest przez przetwornik napięciowy (4). Iskiernik - odgromnik (3) chroni obwód główny przed przepięciami z napowietrznej linii jezdnej. Odbierak można odłączyć poprzez zintegrowany odłącznik – uziemiacz (5). Uziemienie wyłącznika szybkiego (7) zapewniają dwa uziemiacze (6, 8). Uziemiacz (8) jednocześnie uziemia stronę pierwotną transformatora trakcyjnego (12) i drugie urządzenie przeciwprzepięciowe (9). Przetworniki napięcia (10) i prądu (11) monitorują parametry elektryczne po stronie pierwotnej transformatora trakcyjnego. Do uzwojeń wtórnych transformatora trakcyjnego podłączone są dwa prostowniki aktywne (13, 14). Prostowniki te zapewniają

dwukierunkowy przepływ energii z/do napowietrznej linii jezdnej, monitorując jednocześnie wszystkie niezbędne parametry elektryczne po stronie głównej szyny zasilającej pojazdu (15).

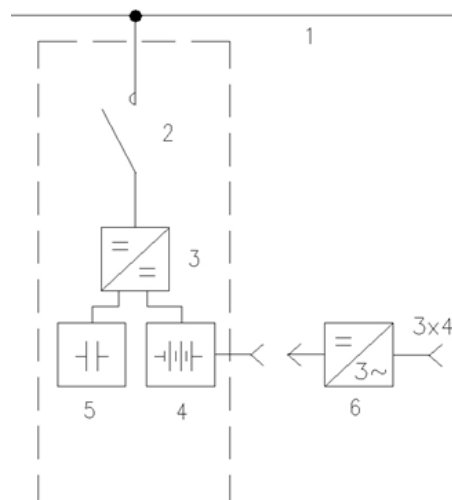
Układ ten może być praktycznie stosowany w obu systemach elektroenergetycznych prądu przemiennego (15 kV i 25 kV), z wykorzystaniem odczepów łączeniowych po stronie pierwotnej uzwojenia transformatora.

Kolejnym źródłem energii dla pojazdu jest spalinowy zespół prądotwórczy. Praca z jego wykorzystaniem odbywać się będzie tylko w sytuacjach awaryjnych. Takie założenie pozwala na znaczne zmniejszenie mocy zespołu prądotwórczego, co ma umożliwić zasilanie przetwornic pomocniczych pojazdu i jazdę z ograniczoną prędkością – na krótkich dystansach



Rys.4. Schemat blokowy układu zasilania z zespołu prądotwórczego

Silnik spalinowy (1) jest połączony z generatorem prądu przemiennego (2). Planowane jest zastosowanie generatora samowzbudnego z magnesami trwałymi. To znacznie upraszcza sterowanie zespołem prądotwórczym, eliminując konieczność zastosowania oddzielnego układu regulacji wzbudzenia prądnicy głównej. Prostownik sterowany ze zintegrowanym systemem zabezpieczającym (3) przetwarza napięcie przemiennie z generatora na napięcie stałe. Stycznik (4) umożliwia odłączenie agregatu prądotwórczego od głównej szyny zasilającej pojazdu (5).



Rys.5. Schemat blokowy układu bateryjnego zasobnika energii

Ostatnim modułem źródła energii dla pojazdu jest moduł z bateryjnym zasobnikiem energii. Moduł ten ma być wykorzystywany do dojazdu pojazdem do miejsca pracy bez korzystania z sieci trakcyjnej, także z możliwością prowadzenia kilku wagonów roboczych.

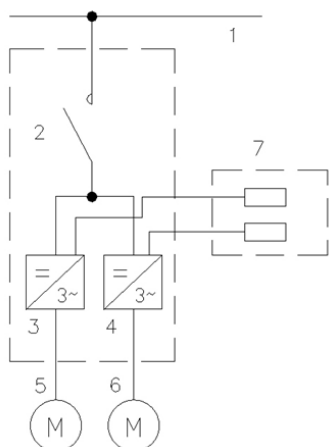
Baterijny zasobnik energii ma być również wykorzystywany podczas prac na infrastrukturze kolejowej pojazdu. Zakładana ilość zmagazynowanej energii powinna wystarczyć na ponad 8 godzin pracy.

Układ baterijnego zasobnika energii składa się ze stycznika (2), który odcina magazyn energii od głównej szyny napędowej pojazdu (1). Dwukierunkowa przetwornica (3) napięcia z izolacją zapewnia dostosowanie napięcia akumulatorów zasobnika energii (zazwyczaj mają one napięcie robocze poniżej 1 kV). Zapewnia również możliwość ładowania akumulatora energii (4) z szyny zasilającej. Aby móc w krótkim czasie pochłonąć dużą ilość energii (np. energię z hamowania elektrodynamicznego pojazdu), przewidziany jest dodatkowy magazyn energii zbudowany z wykorzystaniem superkondensatorów (5). Rozwiązania z superkondensatorami umożliwiającymi magazynowanie energii z hamowania stosowane były z powodzeniem na pojazdach szynowych [3]. Przetwornica (3) będzie również umożliwiać ładowanie baterijnego zasobnika energii z superkondensatorów. Baterijny zasobnik energii zawiera niezbędne obwody sterujące (np. BMS) i diagnostyczne.

Zasadniczo w pojeździe nie przewiduje się instalacji ładowarki AC, a jedynie złącze ładowania akumulatora DC. Ładowarka zewnętrzna (6) służy do ładowania baterijnego zasobnika energii standardowym zasilaniem z sieci energetycznej 3x400 V AC. Należy jednak rozważyć możliwość zainstalowania takiej ładowarki (o ograniczonej mocy), gdyż nie można zagwarantować zwrotu pojazdu do określonej bazy w celu naładowania.

#### Odbiorniki energii

Pojazd jest wyposażony w cztery osie napędowe, każda z nich napędzana jest asynchronicznym silnikiem trakcyjnym. W pojeździe zastosowane będą dwa zespoły falowników trakcyjnych (po jednym na jeden wózek pojazdu), każdy z nich zawierać będzie dwa falowniki, sterujące indywidualnie poszczególnymi silnikami.



Rys.6. Schemat blokowy obwodu falowników trakcyjnych

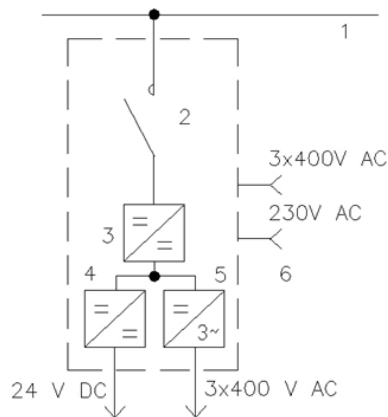
Zespół dwóch falowników trakcyjnych (3, 4) zasilany jest z głównej szyny zasilania pojazdu (1) poprzez stycznik (2). Stycznik zapewnia wyłączenie zespołu falowników w przypadku awarii. Silniki trakcyjne trójfazowe (5, 6) zasilane są z falowników. Możliwe jest też hamowanie elektrodynamiczne z odzyskiem energii - poprzez główną szynę zasilania pojazdu lub z wykorzystaniem zestawu rezystorów hamowania (7) w przypadku braku możliwości magazynowania energii w zasobniku lub oddania jej do sieci trakcyjnej.

Drugi obwód odbiorczy na szynie zasilającej stanowi zespół przetwornic pomocniczych. Przetwornica pomocnicza zasilająca wszystkie obwody wewnętrzne pojazdu,

dostarczając napięcie 3x400 V AC do napędów pomocniczych, takich jak wentylatory silników trakcyjnych, czy sprężarka główna. Osobny moduł stanowi przetwornica, dostarczająca napięcie 24V DC do pojazdu, będąca jednocześnie ładowarką baterii akumulatorów rozruchowych, stanowiących podstawowe źródło napięcia pomocniczego 24 V DC dla pojazdu.

Ze względów bezpieczeństwa (na wypadek awarii) przewidziana jest zabudowa dwóch zestawów przetwornic pomocniczych.

Istnieje możliwość rozbudowy przekształtnika o moduły 3x400 V AC o regulowanej częstotliwości wyjściowej, umożliwiające regulację prędkości obrotowej napędów pomocniczych lub realizację funkcji softstartu. Dla uproszczenia pokazano tylko jeden moduł 3x400 V AC.



Rys.7. Schemat blokowy obwodu przetwornic pomocniczych

Moduł wysokiego napięcia przetwornicy (3) jest zasilany z głównej szyny zasilającej pojazdu (1) poprzez stycznik (2). Przetwornica zawiera moduły DC (4) i AC (5), które zapewniają niezbędne napięcia do pracy pojazdu. Złącza zasilania zewnętrznego (6) umożliwiają ładowanie akumulatora za pomocą sieci napięcia przemiennego. Istnieje również możliwość wykorzystania tych wejść jako warsztatowego obwodu zasilania pojazdu 3x400 V AC.

#### Tryby pracy pojazdu

Możemy wyróżnić dwa podstawowe tryby pracy pojazdu. Pierwsza to praca z wykorzystaniem zasilania z sieci trakcyjnej. Drugi to praca z wykorzystaniem baterijnego zasobnika energii. Trzecim trybem – stosowanym tylko w sytuacjach awaryjnych – jest praca pojazdu przy zasilaniu z agregatu prądotwórczego.

Podczas pracy z wykorzystaniem sieci trakcyjnej, praktycznie nie ma ograniczeń co do mocy dostarczanej do pojazdu. Możliwe jest również ładowanie akumulatorowego zasobnika energii. Jednocześnie baterijny zasobnik energii powinien służyć do odzyskiwania energii hamowania i wspomaganie rozruchu pojazdu. Może to znacznie zmniejszyć zużycie energii elektrycznej z sieci trakcyjnej. Podczas hamowania energia powinna być wykorzystywana w pierwszej kolejności na potrzeby pojazdu, a następnie magazynowana w baterijnym zasobniku energii. Możliwe jest również doprowadzenie energii do sieci trakcyjnej – gdy akumulator jest w pełni naładowany. Energia hamowania elektrodynamicznego może być również rozproszona w zespołach rezystorów hamowania, jednak nie jest to bardzo korzystne ze względu na nieodwracalną utratę tej energii.

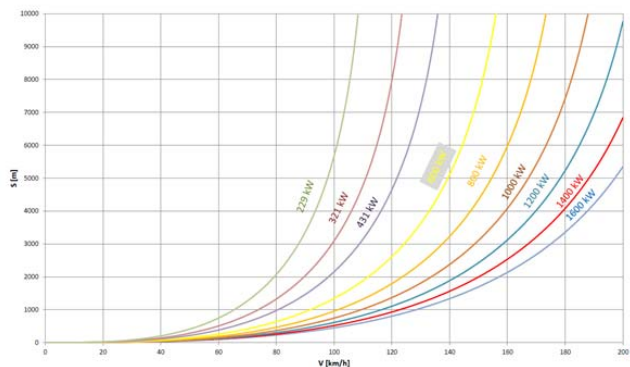
Wykorzystanie baterijnego zasobnika energii do zasilania pojazdu skutkuje pewnym ograniczeniem wartości dostępnej mocy, zarówno na cele trakcyjne, jak i potrzeby własne pojazdu. W takim przypadku system sterowania (TCMS) musi uwzględnić konieczność „oszczędnej”

eksploatacji pojazdu, przy znacznym ograniczeniu potrzeb własnych, np. ograniczenie prędkości napędów pomocniczych. Koniecznością jest też ograniczenie przez system sterowania dostępnej mocy trakcyjnej. Podczas jazdy z wykorzystaniem baterijnego zasobnika energii należy przeprowadzić rozruch pojazdu przy niskich wartościach przyspieszenia, aby zmniejszyć całkowite zużycie energii przez pojazd. W przypadku hamowania – pierwszeństwo należy przyznać hamowaniu elektrodynamicznemu z uwzględnieniem możliwości odbioru energii przez baterijny zasobnik energii.

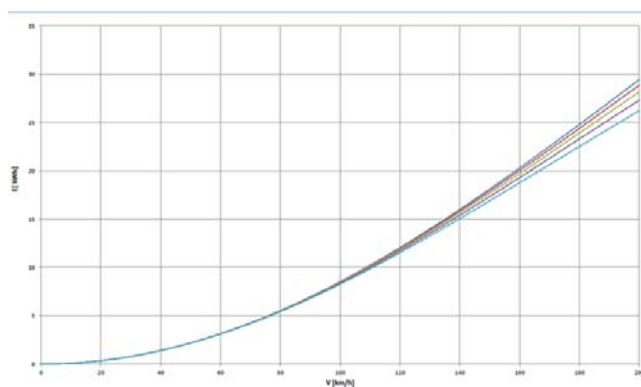
Ostatni tryb pracy pojazdu stanowi praca z wykorzystaniem spalinowego zespołu prądowłórczego. Jest to tryb pracy stosowany wyłącznie w sytuacjach awaryjnych (brak napięcia w sieci trakcyjnej lub jej nieobecność oraz wyczerpywanie się baterijnego zasobnika energii). W takim przypadku system sterowania zapewnia pracę zespołu prądowłórczego z mocą znamionową – na potrzeby trakcyjne i własne, oraz jak najszybsze doładowanie baterijnego zasobnika energii. W tym przypadku również zasadne jest zastosowanie redukcji zużycia energii na potrzeby trakcyjne i potrzeby własne pojazdu.

### Teoretyczne charakterystyki trakcyjne

Aby zweryfikować poprawność przyjętych założeń, wykonano obliczenia teoretyczne, umożliwiające wyznaczenie charakterystyk trakcyjnych projektowanego pojazdu.



Rys.8. Teoretyczna charakterystyka rozruchu pojazdu



Rys.9. Teoretyczna charakterystyka możliwości odzysku energii podczas hamowania elektrodynamicznego

Rodzinę charakterystyk rozruchu wyznaczono dla różnych wartości mocy, przeznaczonych do celów trakcyjnych. Określono charakterystykę pojazdu do samodzielnego poruszania się po płaskim torze. Dla trójfazowej podano wartości od 600 kW w górę, natomiast niższe wartości mocy przedstawiają możliwości rozruchu

pojazdu w trybie pracy z wykorzystaniem baterijnego zasobnika energii lub zespołu prądowłórczego.

W celu doboru parametrów energetycznych (moc chwilowa, całkowita energia zmagazynowana) dla baterijnego zasobnika energii, wyznaczono również teoretyczną rodzinę charakterystyk dla hamowania elektrodynamicznego z poszczególnych prędkości. W tym przypadku wyznaczono charakterystyki odzysku energii hamowania elektrodynamicznego dla maksymalnej mocy silników trakcyjnych w zakresie 1000 kW – 1800 kW. Jak zauważyć można, wartości te są zbliżone. Różnica występuje tylko w zakresie dużych prędkości.

### Wnioski

Opracowana koncepcja obwodu głównego dla hybrydowego pojazdu szynowego i sposobu jego sterowania może być zastosowana w różnych pojazdach szynowych, nie tylko w pojazdach pomocniczych.

Podział obwodu głównego na współpracujące (lecz całkowicie niezależne) moduły źródeł i odbiorników energii umożliwiła dobór odpowiedniej kombinacji do konkretnego zastosowania i wykonania pojazdu w pełni dostosowanego do potrzeb użytkownika.

W warunkach rzeczywistych przyjmuje się zwykle mniejsze wartości prędkości niż wyznaczane teoretycznie. Należy również zwrócić uwagę na zwiększone opory ruchu na pochyłościach toru lub podczas jazdy z wagonami, które mogą znacznie ograniczyć właściwości trakcyjne.

Wykorzystanie energii z hamowania elektrodynamicznego do ładowania baterijnego zasobnika energii może znacznie zmniejszyć zużycie energii przez pojazd.

Artykuł powstał w związku z realizacją projektu pn. „Innowacyjny, specjalny pojazd kolejowy z napędem hybrydowym udoskonalony o zasilenie z zasobników energii, będący bazą do montażu urządzeń przeznaczonych do budowy, diagnostyki i pomiarów infrastruktury kolejowej”. Artykuł został sfinansowany w ramach Poddziałania 1.1.1 Badania przemysłowe i prace rozwojowe realizowane przez przedsiębiorstwa, współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.



**Autorzy:** dr inż. Maksymilian Cierniewski, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny, Centrum Pojazdów Szynowych, ul. Warszawska 181, 61-055 Poznań, E-mail: [maksymilian.cierniewski@pit.lukasiewicz.gov.pl](mailto:maksymilian.cierniewski@pit.lukasiewicz.gov.pl), mgr inż. Wojciech Jakuszko, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny, Centrum Pojazdów Szynowych, ul. Warszawska 181, 61-055 Poznań, E-mail: [wojciech.jakuszko@pit.lukasiewicz.gov.pl](mailto:wojciech.jakuszko@pit.lukasiewicz.gov.pl), dr inż. Paweł Stobnicki, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Poznański Instytut Technologiczny, Centrum Pojazdów Szynowych, ul. Warszawska 181, 61-055 Poznań, E-mail: [pawel.stobnicki@pit.lukasiewicz.gov.pl](mailto:pawel.stobnicki@pit.lukasiewicz.gov.pl).

### LITERATURA

- [1] P. Michalak, W. Jakuszko: Innowacyjna uniwersalna lokomotywa dwunapędowa. *Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie. Seria: Materiały Konferencyjne*. 2019, 2(119), 149-158.
- [2] P. Urbański, D. Gallas, A. Stachowicz, W. Jakuszko, P. Stobnicki: Analysis of the selection of the auxiliary drive system for a special purpose hybrid rail vehicle, *Rail Vehicles*, No. 1, pp. 30-39, 2022. doi:10.53502/RAIL-149405.
- [3] Z. Giziński, P. Giziński, Energy storage devices for subway trains, *Rail Vehicles*: No. 1, pp. 26-34, 2018. doi:10.53502/RAIL-138476.