

prof. dr hab. inż. Ireneusz Pielecha

Politechnika Poznańska

prof. dr hab. inż. Jerzy Merkiś

Politechnika Poznańska

dr inż. Maciej Andrzejewski

Sieć Badawcza Łukasiewicz –

Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”

dr inż. Paweł Daszkiewicz

Sieć Badawcza Łukasiewicz –

Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”

mgr Robert Świechowicz

Politechnika Poznańska

dr inż. Mateusz Nowak

Sieć Badawcza Łukasiewicz -

Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”

Ultracapacitors and fuel cells in rail vehicle drive systems

Ultrakondensatory i ogniwa paliwowe w układach napędowych pojazdów szynowych

The article presents the issues of current and future solutions used in rail vehicle drive systems. The review and analysis of energy storage possibilities in vehicles including electrochemical, mechanical and hydraulic accumulators and batteries has been made. The importance of their charging frequency is indicated, which translates into their possible uses. Characteristics of hybrid drive systems with particular emphasis on systems with fuel cells and ultracapacitors were presented. Current and conceptual solutions of series and parallel drive systems have been presented.

W artykule przedstawiono zagadnienia aktualnych i przyszłościowych rozwiązań układów napędowych stosowanych w pojazdach szynowych. Dokonano przeglądu oraz analizy możliwości gromadzenia energii w pojazdach z uwzględnieniem akumulatorów elektrochemicznych, mechanicznych oraz hydraulicznych. Wskazano na duże znaczenie częstości ich ładowania, co przekłada się na możliwość ich zastosowania. Przedstawiono charakterystyki układów napędu hybrydowego ze szczególnym uwzględnieniem układów z ogniwami paliwowymi oraz ultrakondensatorami. Zaprezentowano obecne i koncepcyjne rozwiązania szeregowych i równoległych układów napędowych.

1. INTRODUCTION

Rail transport is considered the most convenient form of land transport due to its economic, social, energy and environmental benefits. In addition, this branch of transport is characterized by the lowest ratio of emitted carbon dioxide related to passenger- and ton-kilometer. The main sector of rail transport is, however, freight transport, accounting for 11% of total goods transported in the EU. Due to the advantages of rail transport many countries plan to increase its competitiveness in relation to the most commonly used road transport. For this purpose, it is necessary to expand and develop the railway infrastructure. Currently, the total estimated length of railway lines in the EU is approximately 215,000 km. Half of which is electrified. This means that over a distance of 100,000 km rail vehicles must draw energy from a different source than electric traction. On such track sections,

1. WPROWADZENIE

Transport kolejowy jest uważany za najbardziej dogodną formę transportu lądowego ze względu na korzyści: ekonomiczne, społeczne, energetyczne i środowiskowe. Dodatkowo ta gałąź transportu charakteryzuje się najniższym stosunkiem emitowanego dwutlenku węgla odniesionego do pasażera i tona kilometra. Główną częścią transportu kolejowego jest jednak transport towarowy, stanowiący 11% ogólnego transportu towarów w UE. Ze względu na zalety, jakie posiada transport szynowy w wielu krajach planowane jest zwiększenie jego konkurencyjności względem aktualnie najczęściej wykorzystywanego transportu drogowego. W tym celu niezbędna jest rozbudowa i rozwój infrastruktury kolejowej. Aktualnie, całkowita szacowana długość linii kolejowych w UE wynosi około 215 tys. km, z czego połowa została zelektryfikowana. Oznacza to, że na dystansie 100 tys. km

the most popular solution is to use an internal combustion engine. The technical condition and age of vehicles in many countries is far from satisfactory. The significant depletion of rolling stock directly translates into increased emission of toxic compounds from diesel locomotives. Another important aspect is the exhaust emission standards, which successively reduce the permissible limits of compounds emitted by these vehicles. The above-mentioned phenomena and trends force enterprises to work on more efficient and reliable propulsion systems. The areas in which high intensity of research and development works can be observed are: hybrid systems, fuel cells, mechanical and electrical energy batteries. This article presents trends and solutions in the field of alternative propulsion systems for rail vehicles.

The categorization of propulsion and fuel systems in what is considered the “clean” rail transport is presented in Figure 1. The main technological directions of today can be seen there in the form of: 1) improvement of conventional propulsion systems with increasing fuel efficiency (conventional and alternative drives), 2) use of fuel mixtures: oil propulsion with alternative fuels or mixtures of new low emissivity fuels, 3) application of modern low-emission propulsion systems in technologically advanced form: gas turbines, fuel cells or ultracapacitors in hybrid propulsion systems.

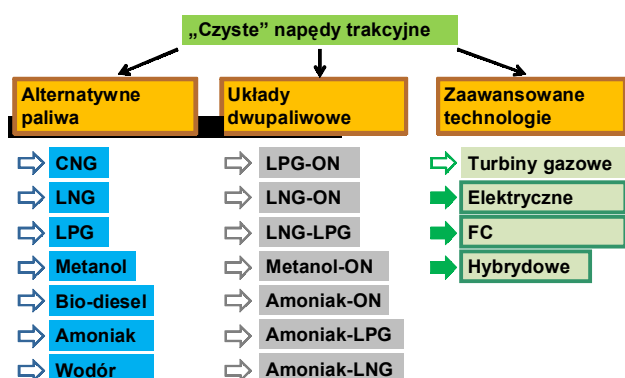


Fig. 1. Potential solutions regarded as „clean” rail transport [5]

Rys. 1. Potencjalne rozwiązania „czystego” transportu kolejowego [5]

The development of hybrid drives in means of transport is one of the factors determining the technological progress in this field. The Pike Research consulting company has been predicting an increasing share of locomotives with hybrid drive systems in the global market for several years, despite the continued growth in the numbers of diesel locomotives in the sector (Figure 2). It is expected that approximately 500 units of this type will be sold in the years 2011–2020, which gives an average annual increase of over 19% [8]. The increase of the hybrid locomotives market share results from changes in the legal regulations on exhaust emissions introduced in 2014/2015. The average annual increase in the use of

pojazdy szynowe muszą czerpać energię z innego źródła niż elektryczna sieć trakcyjna. Na takich obszarach, najpopularniejszym rozwiązaniem jest użycie silnika spalinowego. Stan techniczny oraz wiek pojazdów w wielu krajach daleki jest od zadowalającego. Znaczny stopień wyeksploatowania taboru bezpośrednio przekłada się na zwiększoną emisję związków toksycznych pochodzących z lokomotyw spalinowych. Kolejnym ważnym aspektem są normy emisji spalin, które sukcesywnie obniżają dopuszczalne limity związków emitowanych przez pojazdy. Wyżej wymienione zjawiska oraz tendencje zmuszają przedsiębiorstwa do pracy nad bardziej wydajnymi oraz niezawodnymi układami napędowymi. Obszarami, w których odnotowano dużą intensywność prac badawczych oraz rozwojowych są: układy hybrydowe, ogniwa paliwowe, akumulatory energii mechanicznej oraz elektrycznej. W niniejszym artykule przedstawiono tendencje oraz rozwiązania z dziedziny alternatywnych układów napędowych pojazdów szynowych.

Kategoryzację rozwiązań układów napędu i paliw w „czystym” transporcie kolejowym przedstawiono na rys. 1. Można tam wyróżnić główne kierunki w postaci:

- 1) doskonalenia konwencjonalnych układów napędowych przy zwiększeniu sprawności wykorzystania paliw (konwencjonalnych i alternatywnych),
- 2) wykorzystania mieszanin paliw: oleju napędowego z paliwami alternatywnymi lub mieszanin nowych paliw o małej emisyjności,
- 3) stosowania nowoczesnych niskoemisyjnych układów napędowych w postaci zaawansowanych technologicznie: turbin gazowych, ogniw paliwowych lub ultrakondensatorów w układach napędu hybrydowego.

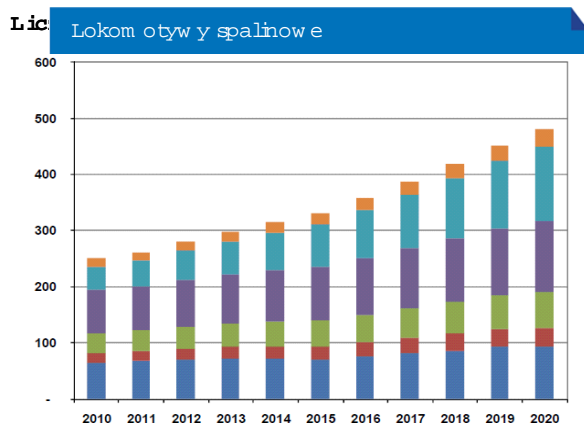
Rozwój napędów hybrydowych w środkach transportu jest jednym z czynników determinujących postęp technologiczny w tej dziedzinie. Firma konsultingowa Pike Research już od kilku lat przewiduje zwiększający się na rynku światowym udział lokomotyw z układami napędu hybrydowego, mimo stałego przyrostu lokomotyw spalinowych (rys. 2). W latach 2011–2020 przewiduje się sprzedaż około 500 jednostek tego typu, co daje średni przyrost roczny o wartości ponad 19% [8]. Zwiększenie udziału lokomotyw hybrydowych na rynku wynika ze zmian przepisów dotyczących emisji spalin wprowadzonych w latach 2014/2015. Średnioroczny przyrost wykorzystania lokomotyw hybrydowych w Europie i USA wynosi około 15%. W Chinach wielkość ta osiągnie około 22%. Pojazdy takie powinny być wyposażone w akumulatory o dużej pojemności elektrycznej. Firma Pike Research [8] przewiduje, że pojazdy te będą wymagały około 514 MWh energii w latach 2011–2020.

Współczesne układy lokomotyw spalinowych mają silniki spalinowe pracujące w układzie generatorów prądu elektrycznego dostarczanego do silników elektrycznych lokomotywy. Napędy hybrydowe mogą być wyposażone w dwa silniki spalinowe i układ genera-

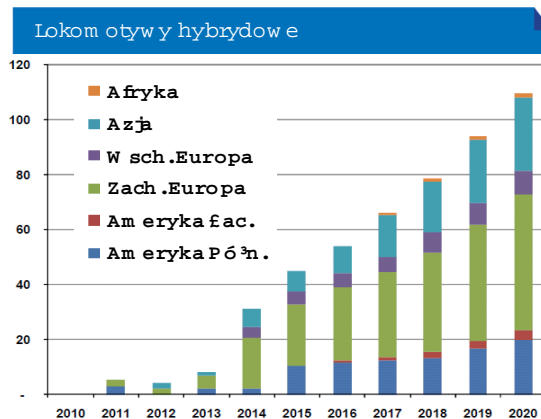
hybrid locomotives in Europe and the USA is around 15%. In China, this figure will reach about 22%. Such vehicles should be equipped with batteries of high electric capacity. Pike Research [8] predicts that these vehicles will require approximately 514 MWh of energy in 2011-2020.

Fig. 2. The sale numbers of diesel and hybrid locomotives in selected parts of the world [8]

Rys. 2. Sprzedaż lokomotyw spalinowych i hybrydowych w wybranych częściach świata [8]



torą oraz silniki trakcyjne lokomotywy. Zużycie energii w przedstawionych powyżej układach może być bardzo zróżnicowane, co przedstawiono na rys. 3. Poziom emisji CO₂ z trakcji spalinowej jest największy i wynosi około 9 kg CO₂/km (niezależnie od stopnia elektryfikacji sieci). Trakcja elektryczna jest w tym aspekcie bardziej ekologiczna i jej równoważna emisja dwutlenku węgla wynosi około 4 kg/km oraz ponad 3 kg/km przy wykorzystaniu układów hamowania regeneracyjnego [16].



The current generation of diesel locomotives have internal combustion engines operating in the drive system as electric current generators supplying power to the locomotive's electric engines. Hybrid drives can be equipped with two internal combustion engines and a generator system on top of the locomotive traction electric motors. The energy consumption in the systems presented above can be very different, as shown in Fig. 3. The CO₂ emission from the combustion engines is the largest and amounts to about 9 kg of CO₂/km (irrespective of the extent of network electrification). Electric traction is in this aspect more ecological and its equivalent emission of carbon dioxide is about 4 kg/km and over 3 kg/km when using regenerative braking systems [16].

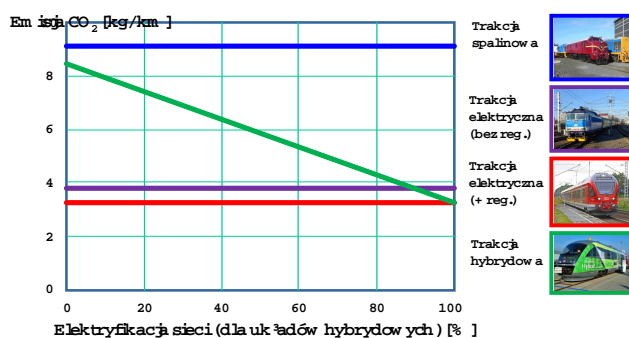


Fig. 3. Carbon dioxide emission from all rail traction sources [16]

The use of hybrid propulsion systems results in more varied carbon dioxide emissions. The lack of electric traction network results in a higher value of CO₂ emissions, as it is not possible to use the electric drive mode of such a vehicle. Increasing the range and extent of the electrified traction network leads to a linear reduction of carbon dioxide emissions. Full electrification of the network should result in hybrid drives being replaced by electric drive systems (identical CO₂ emission levels).

Rys. 3. Emisja dwutlenku węgla ze źródeł trakcji szynowej [16]

Wykorzystanie układów napędu hybrydowego powoduje zróżnicowaną wartość emisji dwutlenku węgla. Brak dostępu do sieci trakcyjnej skutkuje mniejszą wartością emisji CO₂, gdyż możliwe jest wykorzystanie trybu elektrycznego napędu takiego pojazdu. Zwiększenie stopnia elektryfikacji sieci trakcyjnej powoduje liniowe ograniczenie emisji dwutlenku węgla. Elektryfikacja sieci kolejowej powoduje, że napędy hybrydowe powinny być zastąpione przez układy napędów elektrycznych (jednakowe poziomy emisji CO₂).

2. ENERGY STORAGE SYSTEMS ON RAIL TRANSPORT VEHICLES

2. UKŁADY GROMADZENIA ENERGII W POJAZDACH TRANSPORTU SZYNOWEGO

2.1. Energy storage capability

The energy storage solutions in hybrid drive systems are divided into three basic types based on their method of storing energy, those are: kinetic

2.1. Możliwości gromadzenia energii

(mechanical), hydropneumatic and electrochemical. Each of them requires an appropriate energy transmission and conversion system in order to work properly. The efficiency of these systems are not the same and the losses they generate add up for the entire drive system.

Rechargeable energy storage systems (RESS) in vehicles of different technological level have different sizes and levels of complexity. These technologies can be electrochemical systems (batteries, ultracapacitors), flywheels and fuel cells fed, for example, with hydrogen obtained from an on-board reforming system. The power and energy density values of the main energy storage systems are shown in Figure 4.

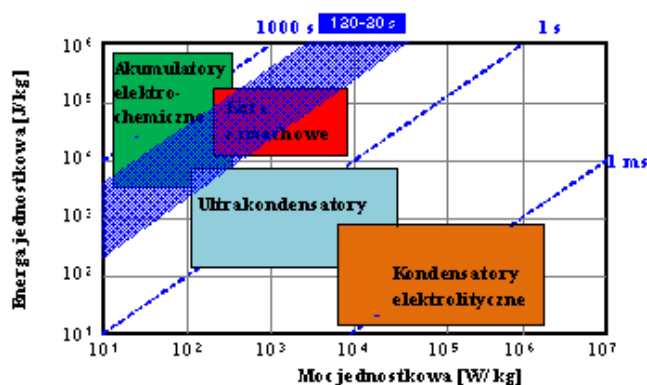


Fig. 4. Energy storage systems based on their power and energy density [9]

Rys. 4. Układy gromadzenia energii na tle mocy i energii jednostkowej tych układów [9]

In addition, the figure marks a time interval appropriate for rail vehicles, where braking may take up to 2 minutes on average. The range of interest applies to energy storage solutions that include: electrochemical batteries, flywheels and ultracapacitors. At the same time it is possible to classify battery groups based on the data as: electrochemical, which are characterized by high energy density and low power density, and ultra-capacitors with high power density.

2.2. Recharging frequency

Based on the charging/discharging conditions of the battery solutions presented in Figure 4, it is possible to determine the battery charging frequency ratio f using the equation:

$$f = \frac{\rho_P \left[\frac{W}{kg} \right]}{\rho_E \left[\frac{J}{kg} \right]}$$

where: ρ_P – is the power density, and ρ_E – is the energy density of a given battery.

Using the above formula, the distribution of battery types was obtained relative to the energy available and the frequency at which they need to be recharged (Figure 5). The data contained in the figure indicate large possibilities of using electrochemical batteries and ultracapacitors.

Ze względu na sposób akumulacji energii w układach napędu hybrydowego wyróżnia się trzy podstawowe rodzaje akumulatorów: kinetyczne (mechaniczne), hydropneumatyczne i elektrochemiczne. Każdy z nich wymaga współpracy z odpowiednim układem przesyłania oraz transformacji energii. Sprawności tych układów nie są jednakowe i obciążają cały napęd swymi stratami.

Akumulacyjne systemy gromadzenia energii (RESS – *rechargeable energy storage systems*) w pojazdach o zróżnicowanej technologii mają różne wielkości oraz stopnie ich rozwoju. Systemy te mogą być układami elektrochemicznymi (akumulatory, ultrakondensatory), kołami zamachowymi oraz ogniwami paliwowymi zasilanymi np. wodorem uzyskanym z reformingu pokładowego. Wartości gęstości mocy i energii podstawowych układów gromadzenia energii przedstawiono na rys. 4.

Dodatkowo na rysunku tym określono przedział czasowy odpowiedni dla pojazdów trakcji szynowej, gdzie hamowanie może trwać średnio do 2 minut. Obszar obejmujący rozwiązania gromadzenia energii dotyczy akumulatorów elektrochemicznych, kół zamachowych oraz ultrakondensatorów. Możliwa jest jednocześnie klasyfikacja danych grup akumulatorów. Akumulatory elektrochemiczne cechują się dużą energią oraz małą mocą jednostkową w przeciwieństwie do ultrakondensatorów o dużej mocy jednostkowej.

2.2. Częstość ładowania

Na podstawie przedstawionych na rys. 4 warunków ładowania/rozładowania akumulatorów możliwe jest określenie wskaźnika częstotliwości f ładowania akumulatorów na podstawie równania:

$$f = \frac{\rho_P \left[\frac{W}{kg} \right]}{\rho_E \left[\frac{J}{kg} \right]}$$

gdzie: ρ_P – jest jednostkową gęstością mocy, a ρ_E – jednostkową gęstością energii danego akumulatora.

Wykorzystując powyższy wzór uzyskano rozkład typów akumulatorów w zależności od dysponowanej energii oraz częstotliwości ich ładowania (rys. 5). Dane zawarte na rysunku wskazują na duże możliwości użytkowania akumulatorów elektrochemicznych oraz ultrakondensatorów.

3. NAPĘDY HYBRYDOWE POJAZDÓW SZYNOWYCH

3.1. Wprowadzenie

Klasyczne układy napędów hybrydowych zawierają oprócz silników spalinowych najczęściej silniki elektryczne. Charakterystykę typowego silnika spalinowego przedstawiono na rys. 6. Analiza porównawcza wskazuje na ograniczone pole maksymalnej

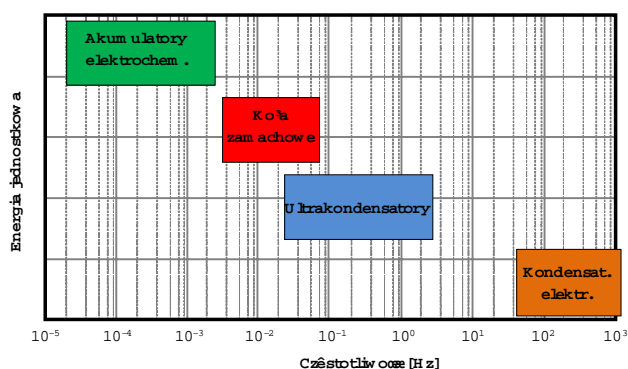


Fig. 5. Battery charging frequency [9]

Rys. 5. Częstotliwości ładowania akumulatorów [9]

3. HYBRID DRIVES OF RAIL VEHICLES

3.1. Introduction

Classic hybrid drive systems usually contain electric motors in addition to internal combustion engines. The characteristic power curves of a typical internal combustion engine are shown in Fig. 6. A comparative analysis indicates a limited field of maximum efficiency of an internal combustion engine (Fig. 6a), with a high value of nitrogen oxides emission around the power curve (Fig. 6b). Against this background, electric motors obtain much greater efficiency with a slightly smaller field of operation in such engines. Electrical motors with permanent magnets (Fig. 6c) are characterized by a wider field of maximum efficiency (about 96%) than induction motors (Fig. 6d - maximum efficiency is about 93%).

3.2. Hybrid drive systems with ultracapacitors

A typical construction of two-layer capacitors (for use in hybrid drive systems) is as follows: the two layers are formed at the electrode and electrolyte boundary, where current carriers accumulate; During low voltage operation, no current flows, and in conductive electrolyte, moving ions accumulate near one of the electrodes. Ultracapacitor electrodes are made of active carbon, which has a very large active surface area, and are separated by a thin, porous membrane (separator that allows the passage of ions). The coal is soaked in electrolyte, which sometimes is a sulfuric acid solution [12].

A big problem of such systems is the low acceptable operating voltage (about 2V to 3V). At higher voltages, electrolysis could take place leading to an explosion of the capacitor due to the pressure of the gases produced. A typical performance characteristic is shown in Fig. 7.

The ultracapacitors used in the hybrid drive systems of railway vehicles operate as elements connected in parallel both in typical solutions with an internal combustion engine (with a hydrokinetic converter) and in current generator systems (a serial

sprawności silnika spalinowego (rys. 6a), przy jednoczesnej dużej wartości emisji tlenków azotu w okolicach charakterystyki zewnętrznej (rys. 6b). Na tym tle silniki elektryczne uzyskują znacznie większe sprawności przy nieco mniejszym polu pracy takich silników. Maszyny elektryczne z magnesami trwałymi (rys. 6c) charakteryzują się szerszym polem maksymalnej sprawności (około 96%) niż silniki indukcyjne (rys. 6d – maksymalna sprawność to około 93%).

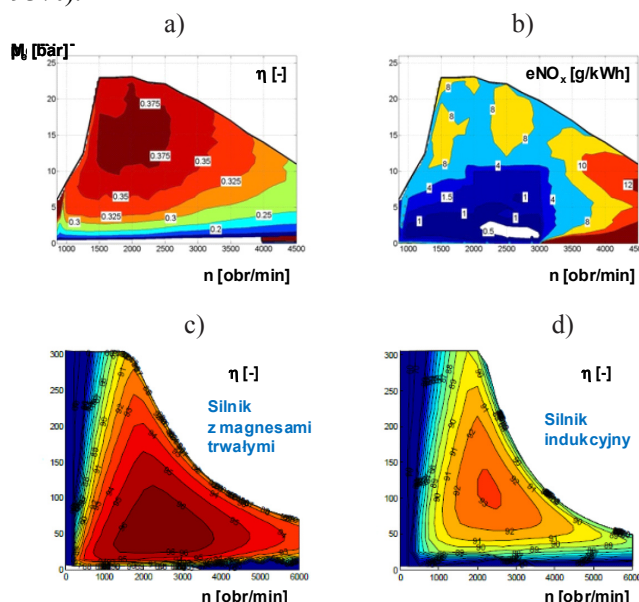


Fig. 6. Examples of characteristics of internal combustion engines and electric motors: a) general ICE power curve, b) ICE emission, c) electric with permanent magnets, d) induction motor [10]

Rys. 6. Przykładowe charakterystyki silnika spalinowego: a) ogólna, b) emisyjna oraz silnika elektrycznego, c) z magnesami trwałymi, d) indukcyjnego [10]

3.2. Układy napędu hybrydowego z ultrakondensatorami

Typowa budowa dwuwarstwowych kondensatorów (do zastosowań w układach napędów hybrydowych) jest następująca: na granicy elektrod i elektrolitu tworzą się dwie warstwy, gdzie gromadzą się nośniki prądu; podczas zasilania niewielkim napięciem prąd nie płynie, a w przewodzącym elektrolicie poruszające się jony gromadzą się w pobliżu jednej z elektrod. Elektrody ultrakondensatorów wykonuje się z węgla aktywnego, który ma bardzo dużą powierzchnię czynną, są rozdzielone cienką, porowatą membraną (separator, który pozwala przepuszczać jony). Węgiel nasączony jest elektrolitem, czasami roztworem kwasu siarkowego [12].

Dużym problemem takich układów jest małe dopuszczalne napięcie pracy (około 2 V do 3 V). Przy większych napięciach możliwa jest elektroliza i eksplozja kondensatora pod wpływem ciśnienia powstających gazów. Typową charakterystykę pracy przedstawiono na rys. 7.

connection of an internal combustion engine with electric machines). Examples of the use of an internal combustion engine combined with a hydrokinetic converter are shown in Fig. 8.

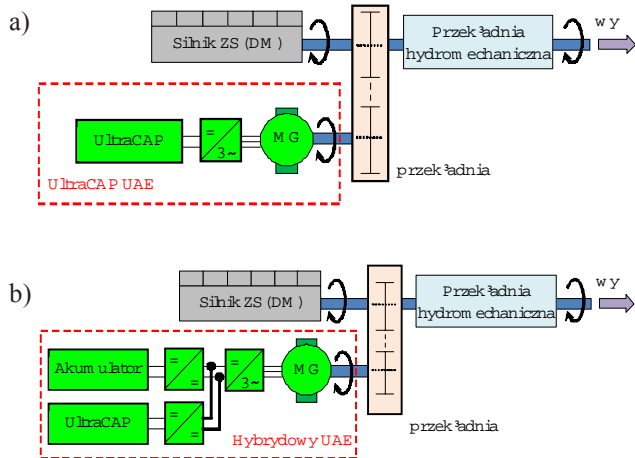


Fig. 8. Hybrid parallel drive of a combustion engine (DM) with a hydromechanical transmission: a) with a capacitor system (ultraCAP) and an electric motor, b) with a system of parallel connected capacitors (ultraCAP) and batteries with an electric motor

In the system shown in Fig. 8a the ultracapacitors are connected in parallel to the internal combustion engine, but they are in a serial connection with an electric motor. Due to the fact that they are a source of constant voltage, a constant voltage converter system is required in order to produce alternating current (usually three-phase voltage). In the system presented in Fig. 8b, the ultracapacitors work in a parallel system with batteries. In such a system, voltage converters matching the battery voltage to ultracapacitors or to another voltage value are also required, which in the next system is converted into alternating current (also three-phase voltage).

Another configuration of hybrid drive in rail vehicles is a power generator (CI engine) connected in series with an electric motor. The system of ultracapacitors (Fig. 9a) or ultra-capacitors with batteries (Fig. 9b) is then connected in parallel to such a system.

An extension of the configuration from Fig. 9b is the possibility of using a voltage converter for battery or ultracapacitor (Fig. 10). The cheapest solution is a system of batteries and ultracapacitors connected in parallel with no voltage converters. In such a system

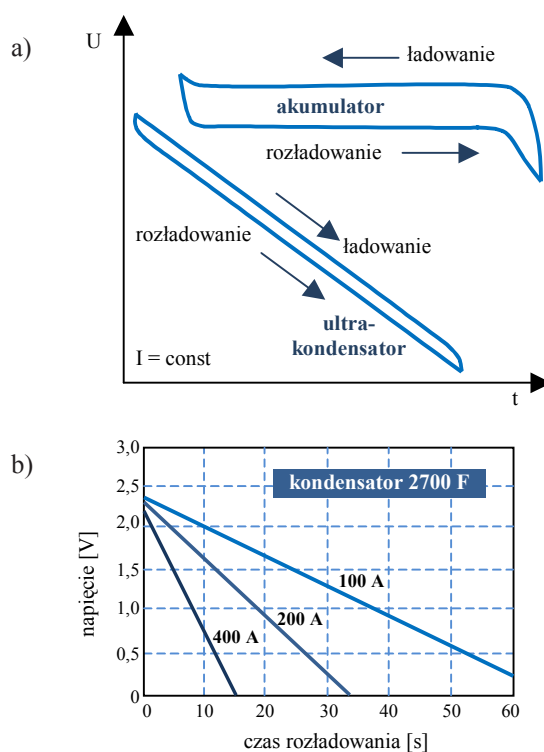
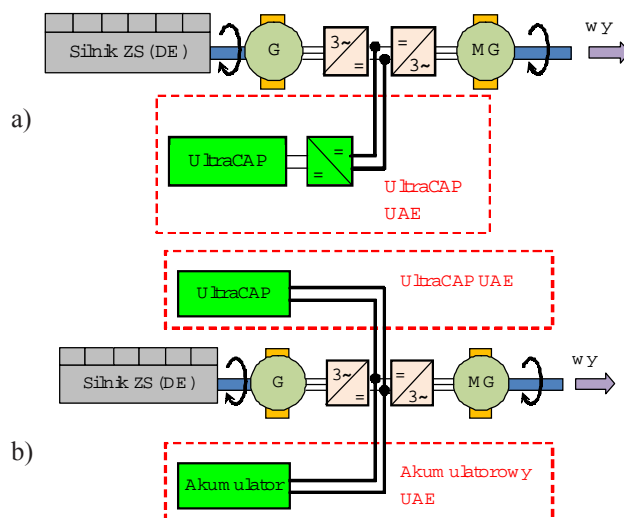


Fig. 7. Discharge curve (a) of a typical battery and ultracapacitor [18] and (b) an example characteristic of an ultracapacitor [17]

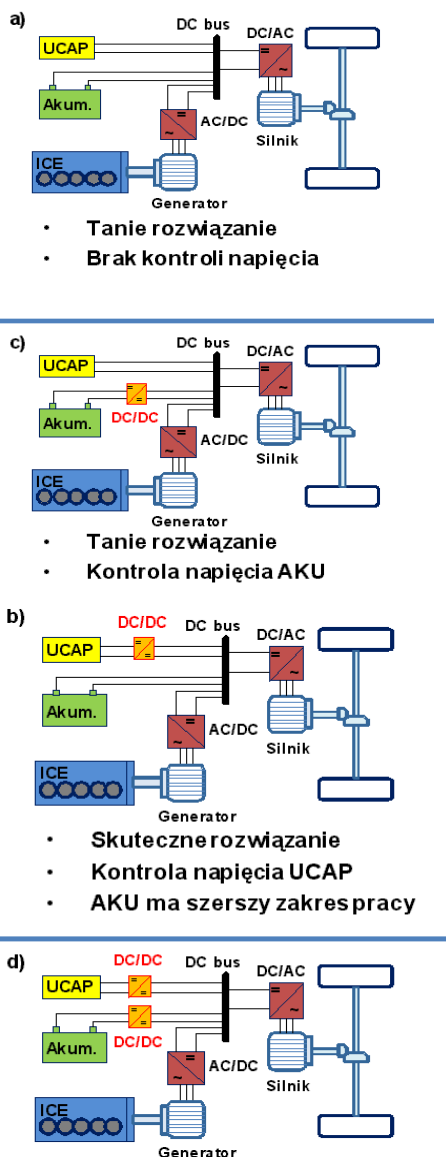
Ultrakondensatory wykorzystywane w układach napędu hybrydowego pojazdów szynowych pracują jako elementy połączone równolegle zarówno w typowych rozwiązaniach z silnikiem spalinowym (z przekładnią hydrokinetyczną) oraz w układach generatora prądu (szeregowe połączenie silnika spalinowego z maszynami elektrycznymi). Przykłady użycia silnika spalinowego połączonego z przekładnią hydrokinetyczną przedstawiono na rys. 8.



Rys. 9. Napęd hybrydowy szeregowy z silnikiem elektrycznym jako generatorem prądu połączonym równolegle: a) z układem kondensatorów (ultraCAP), b) z układem kondensatorów (ultraCAP) i akumulatorów

there is a reduction of currents, and the construction of the circuit is simple. However, these solutions lead to operating problems. The ultracapacitor voltage is proportional to its state of charge and changes almost linearly (Fig. 7a). It follows that the voltage of the battery and the capacitor will differ as shown in Fig. 7a. The voltage difference will transfer some of the energy from the battery to the ultracapacitor, leading to additional energy losses.

A more advantageous variant is to place a DC/DC converter in the ultracapacitor (Fig. 9b) or the battery systems (Fig. 9c). The best solution is to use two DC/DC converter circuits (Figure 9d). However, this solution is expensive and complicated, not to mention it tends to generate the largest amount of system losses (the efficiency of the voltage converter is over 85%). This allows to control both the battery and ultracapacitor voltage. The compromise in this solution is the use of only one DC/DC converter. In this case, it should be placed in the ultracapacitor system, because the batteries experience much lower voltage fluctuations. With this solution, the efficiency and use of the ultracapacitor system can be increased.



Ultrakondensatory w układzie zgodnym z rys. 8a połączone są równolegle z silnikiem spalinowym, jednak stanowią połączenie szeregowe z silnikiem elektrycznym. Ze względu na fakt, że są źródłem napięcia stałego wymagany jest układ przekształtnika napięcia stałego na napięcie przemiennie (najczęściej trójfazowe). W układzie zgodnym z rys. 8b, ultrakondensatory pracują w układzie równoległym z akumulatorami. W takim układzie również wymagane są przekształtniki napięcia dopasowujące napięcie akumulatorów do ultrakondensatorów lub do innej wartości napięcia, które w kolejnym układzie jest zamieniane na napięcie prądu przemiennego (trójfazowego).

Inną konfigurację napędu hybrydowego w pojazdach szynowych stanowi generator prądu (silnik ZS) połączony szeregowo z silnikiem elektrycznym. Do takiego układu podłączony jest równoległe układ ultrakondensatorów (rys. 9a) lub ultrakondensatorów z akumulatorami (rys. 9b).

Rozwinięciem konfiguracji z rys. 9b jest możliwość zastosowania układów zmiany napięcia akumulatora lub ultrakondensatora (rys. 10). Najtańszym rozwiązaniem jest układ równoległe połączonych akumulatorów i ultrakondensatorów bez przetworników napięcia. W układzie takim występuje redukcja prądów, a budowa obwodu jest prosta. Pojawiają się jednak problemy dotyczące działania tych układów. Napięcie ultrakondensatora jest proporcjonalne do stanu jego naładowania i zmienia się prawie liniowo (rys. 7a). Wynika z tego, że napięcie akumulatora i kondensatora będą się różnić niż przedstawione na rys. 7a. Różnica napięć spowoduje przenoszenie części energii z akumulatora do ultrakondensatora powodując dodatkowe straty.

Korzystniejszym wariantem jest umieszczenie przekształtnika DC/DC w układzie ultrakondensatora (rys. 10b) lub akumulatora (rys. 10c). Najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie dwóch układów przekształtników DC/DC (rys. 10d). Jednakże jest to rozwiązanie drogie i skomplikowane, a jednocześnie generujące największe straty układu (sprawność przekształtnika napięcia wynosi ponad 85%). Pozwala na kontrolę napięcia akumulatora oraz ultrakondensatora. Kompromisem w tym zestawieniu jest użycie tylko jednego układu DC/DC. W takim przypadku powinien być on umieszczony w układzie ultrakondensatora, gdyż napięcie akumulatora wykazuje znacznie mniejsze wahania wartości. W ten sposób sprawność i wykorzystanie układu ultrakondensatora może być większe.

Fig. 10. Serial hybrid drive of an internal combustion engine with a generator and electric motor system, and with a system of capacitors (ultraCAP) and accumulators with different variants of voltage converters [9, 13]

Rys. 10. Napęd hybrydowy szeregowy silnika spalinowego z układem generatora i silnika elektrycznego, oraz z układem kondensatorów (ultraCAP) i akumulatorów z różnymi wariantami użycia przetwornic napięcia [9, 13]

3.3. Fuel cell drive systems

Work on fuel cells as a future source of energy for vehicle and rail transport drive systems has been ongoing for several decades now [2, 4, 21]. Their use in rail vehicles is currently rare, but prototype and demonstration vehicles equipped with such cells indicate a trend of upcoming changes in this transport sector [7, 14, 15, 20], with a different and specialized control strategy for such drive systems [19, 11].

The solution utilizing Li-Ion batteries with a maximum energy storage capacity of 7.5 kWh is shown in Fig. 11a. In this system, the batteries are connected directly to the DC/AC voltage converter circuit. By using a hybrid series drive system it is possible to recover the braking energy and effectively store it in a Li-Ion battery.

Ultimately the fuel cell system is intended as a replacement for the internal combustion engine, as shown in Fig. 11b. In this system, two 65 kW cells with a voltage of up to 450 V work with a DC/DC converter in order to increase the voltage to 680 V and adapt it to the Li-Ion battery operating voltage. A similar solution using 120 kW fuel cells, but with a higher voltage value after the impulse converter is shown in Fig. 11c. The fuel cell generates a voltage of up to 900 V, and after conversion in the impulse converter system, the voltage reaches 1500 V, which is then directed to the vehicle's induction motors.

3.3. Układy ogniwo paliwowych

Prace nad ogniwami paliwowymi jako przyszłościowym źródłem napędu pojazdów oraz środków transportu szynowego prowadzone są od kilkudziesięciu lat [2, 4, 21]. Ich zastosowanie w pojazdach szynowych jest obecnie niewielkie, jednak demonstratory pojazdów wyposażone w takie ogniwa wskazują na tendencję zmian w tym sektorze transportu [7, 14, 15, 20], przy zróżnicowanej strategii sterowania takim układami [19, 11].

Rozwiązanie z wykorzystaniem akumulatorów Li-Ion o maksymalnej energii 7,5 kWh przedstawiono na rys. 11a. W układzie tym akumulatory podłączono bezpośrednio do obwodu przekształtnika napięcia DC/AC. Wykorzystanie hybrydowego układu napędu szeregowego pozwala na odzyskiwanie energii hamowania i jej gromadzenie w akumulatorze Li-Ion.

Zastąpienie silnika spalinowego układem ogniwo paliwowych przedstawiono na rys. 11b. W tym układzie dwa ogniwa po 65 kW o napięciu do 450 V współpracują z przekształtnikiem DC/DC w celu podwyższenia napięcia do 680 V i dostosowania go do napięcia akumulatora Li-Ion. Podobne rozwiązanie z użyciem ogniwo paliwowych o mocy 120 kW, lecz o większej wartości napięcia za przekształtnikiem impulsowym przedstawiono na rys. 11c. Ogniwo paliwowe generuje napięcie do 900 V, a po konwersji w układzie przekształtnika impulsowego napięcie uzyskuje wartość 1500 V i kierowane jest do silników indukcyjnych pojazdu.

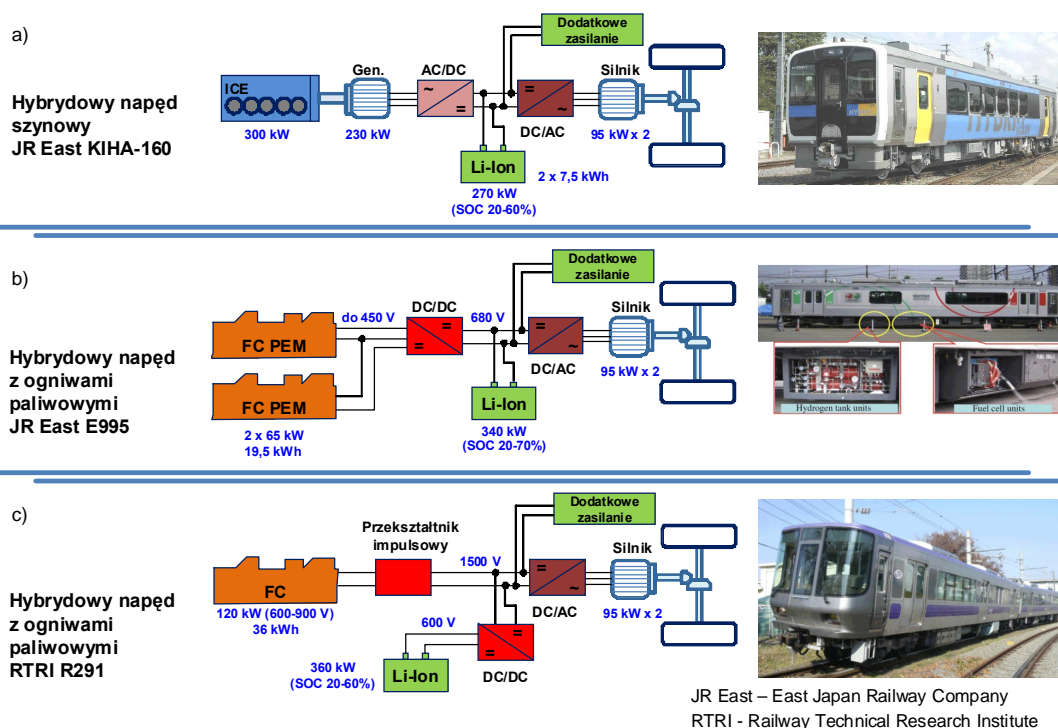


Fig. 11. Examples of the use of Li-Ion batteries (a) and fuel cells in rail vehicles (b-c) by the Japanese railways [6]

Rys. 11. Przykłady zastosowania akumulatorów Li-Ion (a) oraz ogniwo paliwowych w pojazdach szynowych (b-c) kolei japońskich [6]

An American locomotive design equipped with fuel cells was presented by Vehicle Projects LCC [1]. The locomotive, weighing 127 tons, was equipped with low-temperature PEM type fuel cells with a power capacity of 250 kW. The total power of the locomotive, taking into account the batteries, was 1 MW (Figure 12a).

The fuel cell stack (Ballard Power System - Mk902) generates a current at 600 V, when supplied with hydrogen (up to 1.2 MPa) from two 70 kg cylinders, where it is stored at a pressure of 35 MPa. This allows the locomotive to be operated for 8-10 hours. In a typical locomotive load test despite the large instantaneous power values (600-1000 kW) (Figure 12b), the average generated power is only 40-100 kW. It is a result of long periods of drive system operation without any load, which makes the possibilities of using fuel cells in such rail vehicles seem like a more favorable solution.

Amerykański projekt lokomotywy wyposażonej w ogniwa paliwowe zaprezentowany został przez Vehicle Projects LCC [1]. Lokomotywę o masie 127 ton wyposażono w niskotemperaturowe ogniwa paliwowe typu PEM o mocy 250 kW. Moc całkowita lokomotywy, przy uwzględnieniu akumulatorów wynosi 1 MW (rys. 12a).

Stos ogniw paliwowych (Ballard Power System – Mk902) generuje napięcie 600 V, przy zasilaniu wodorem (do 1,2 MPa) z dwóch butli 70 kg, w których jest przechowywany przy ciśnieniu 35 MPa. Pozwala to na eksploatację lokomotywy w czasie 8-10 h. Mimo dużych wartości mocy chwilowych (600-1000 kW) w typowym teście obciążenia lokomotywy (rys. 12b), to moc średnia wynosi tylko 40-100 kW. Wynika to z długich czasów pracy układu bez obciążenia, co zwiększa możliwości wykorzystania ogniw paliwowych w takich pojazdach szynowych.

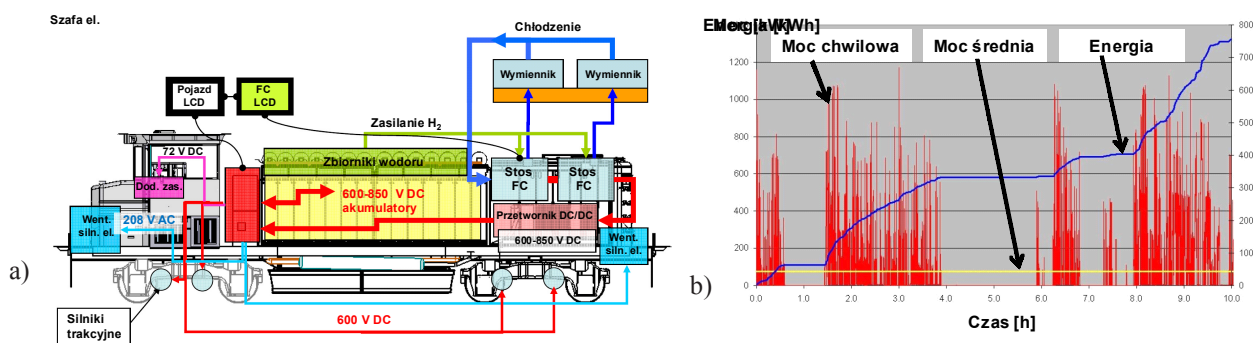


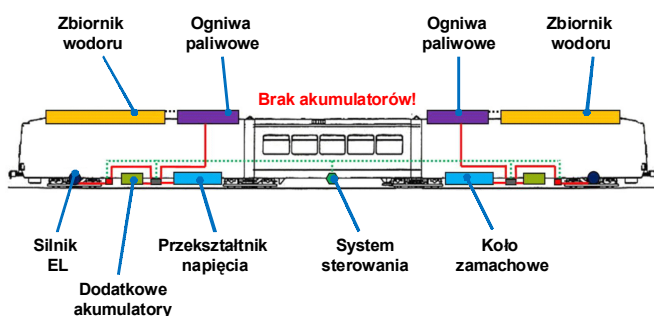
Fig. 12. Locomotive design by *Vehicle Projects LCC* equipped with fuel cells [1]
Rys. 12. Lokomotywa spółki *Vehicle Projects LCC* wyposażona w ogniwa paliwowe [1]

The drive system proposed for the light rail vehicle (*Light Hybrid Electric Train*) is presented in [3]. Hydrogen-powered fuel cells were used, however, without the use of electrochemical batteries (Fig. 13). It was found that flywheels would be a sufficient kinetic energy storage system in a vehicle with hybrid drive. Flywheels (8 pcs) accumulate energy during braking and allow it to be used again when the rail vehicle begins accelerating.

The vehicle consists of two rail vehicles connected by a wagon weighing 73 tons. The power of the whole set is 400 kW and the maximum torque is 1600 Nm. The mechanical energy storage system consists of

Propozycję systemu napędowego lekkiego pojazdu szynowego (*Light Hybrid Electric Train*) przedstawiono w publikacji [3]. Wykorzystano ogniwa paliwowe zasilane wodorem, jednak bez użycia akumulatorów elektrochemicznych (rys. 13). Stwierdzono, że zastosowanie kół zamachowych w układzie hybrydowym będzie wystarczającym kinetycznym układem akumulacji energii. Koła zamachowe (8 szt.) gromadzą energię podczas hamowania oraz pozwalają na jej wykorzystanie podczas przyspieszania pojazdu szynowego.

Pojazd szynowy stanowią dwa wagony napędne połączone wagonem o masie 73 t. Moc układu wynosi



- Koło zamachowe:**
- podłączone do ogniwa paliwowego
 - stanowi akumulator energii dla ogniwa
 - używane podczas hamowania regeneracyjnego

Fig. 13. Equipment elements of a light rail vehicle with a hybrid drive system [3]

Rys. 13. Elementy wyposażenia lekkiego pojazdu szynowego z hybrydowym układem napędowym [3]

flywheels weighing 27 kg, whose speed range is 15,000-60,000 rpm). The power of each flywheel system is 67.5 kW, with a stored energy of 6.66 MJ. Each of the two stacks of fuel cells provides a power output of 110 kW.

The simulation analysis of the vehicle energy consumption carried out on a test route with the length of 23.6 km and with 11 stations (max speed 22 m/s, acceleration/braking 0.6 m/s^2 , stop 60 s) indicates that the fuel cells are permanently in use to provide power (about 210 kW) with the flywheels supplying power regularly providing just over 400 kW (more power is recovered during braking - more than 500 kW). The power of electric motors during acceleration is around 600 kW and is fully covered by the hybrid drive system. Based on simulation analyzes, it has been shown that about 21% of the braking energy can be recovered.

4. CONCLUSIONS

Rail transport is an inseparable element of the transport sector providing transport services for both people and goods. Its significant participation in industry and passenger transport requires the continued improvement of drive systems in order to increase their efficiency and reduce emissions. Some of the factors that also determines the rate of technological development in this field are the prices of fuels and electricity, which normally trend upward. Many research and development centers are currently carrying out intensive work in the field of drive systems as well as energy recovery and storage systems. Despite the increased degree of technological advanced of the new solutions and the higher prices of vehicles equipped with such complex systems, these research works are fully justified due to the positive results they provide for the transport industry. The use of advanced solutions such as: ultracapacitors, mechanical energy accumulators, and increasingly more efficient energy storage devices in rail vehicles has a significant impact on the reduction of their operating costs. Apart from the financial aspect, research works also aim to address the environmental concerns related to transport means. The reduction of the negative environmental impact of rail vehicles is commonly associated with the use of hybrid drive systems, fuel cells and full battery systems. In exhaust emission studies measuring the release of toxic compounds and greenhouse gases, the presented, unconventional solutions were shown to have a notably lesser environmental impact. It means that it should be possible to operate such vehicles in the so-called "Green zones" and closed areas where humans are particularly exposed to the effects of toxic compounds emitted from vehicles and other sources. Positive results of the conducted research leads to the

400 kW, a maksymalny moment obrotowy 1600 Nm. Układ mechanicznego gromadzenia energii stanowią koła zamachowe o masie 27 kg, których zakres prędkości obrotowej wynosi 15-60 tys. obr/min). Moc każdego układu wynosi 67,5 kW, przy zgromadzonej energii 6,66 MJ. Każdy z dwóch stosów ogniw paliwowych ma moc 110 kW.

Analiza symulacyjna zużycia energii prowadzona na długości 23,6 km z użyciem 11 stacji (max prędkość 22 m/s, przyspieszanie/hamowanie $0,6 \text{ m/s}^2$, zatrzymanie 60 s) wskazuje na stałe wykorzystanie mocy ogniw paliwowych (około 210 kW) oraz cyklicznie mocy kół zamachowych do wartości nieco ponad 400 kW (więcej mocy jest odzyskiwane podczas hamowania – ponad 500 kW). Moc silników elektrycznych podczas przyspieszania wynosi około 600 kW i jest w pełni pokrywana przez układ napędu hybrydowego. Na podstawie analiz symulacyjnych wykazano, że możliwe jest odzyskanie około 21% energii hamowania.

4. PODSUMOWANIE

Transport szynowy jest nieodłącznym elementem pozwalającym na świadczeni usług transportowych zarówno ludzi, jak i towarów. Znaczny udział w przemyśle oraz przewozach pasażerskich wymaga udoskonalania układów napędowych w celu zwiększenia ich wydajności oraz ograniczania emisji. Czynnikiem, który również determinuje rozwój w tej dziedzinie są ceny paliw oraz prądu, które cechują się tendencją wzrostową. Aktualnie w wielu ośrodkach prowadzone są intensywne prace badawczo-rozwojowe w obszarze układów napędowych oraz odzyskiwania i magazynowania energii. Pomimo zwiększenia stopnia zaawansowania niektórych rozwiązań oraz wyższych ceny pojazdów wyposażonych w układy, prace te są w pełni uzasadnione ze względu na pozytywne wyniki prowadzonych badań. Zastosowanie w pojazdach szynowych rozwiązań takich jak: ultrakondensatory, akumulatory energii mechanicznej oraz coraz bardziej wydajnych zasobników energii elektrycznej jednoznacznie wpływa na obniżenie kosztów eksploatacji. Prace badawcze poza aspektem finansowym mają również na celu względy środowiskowe. Obniżenie negatywnego wpływu pojazdów szynowych na otoczenie związane jest z zastosowaniem układów hybrydowych, ogniw paliwowych oraz układów w pełni akumulatorowych. W badaniach pomiaru emisji związków toksycznych oraz gazów cieplarnianych odnotowano mniejszą uciążliwość dla środowiska zaprezentowanych, niekonwencjonalnych rozwiązań. Oznacza to możliwość stosowania takich pojazdów w tzw. „zielonych strefach” oraz obszarach zamkniętych, gdzie człowiek jest szczególnie narażony na oddziaływanie związków toksycznych. Pozytywne wyniki przeprowadzanych badań skutkują

implementation of the solutions, devised in the laboratory, into use in the commercial sphere. Many rail operators consciously decide to purchase such vehicles, despite the higher listing price, due to their lower operating costs and reduced environmental impact. The trend of replacing conventional drive vehicles with vehicles using alternative drives is stronger each year, which is among others due to the increasingly more conscious and environmentally aware society.

wdrażaniem rozwiązań ze sfery laboratoryjnej do komercyjnej. Wielu przewoźników świadomie ze względu na niższe koszty użytkowania oraz zmniejszoną emisję związków do środowiska decyduje się na zakup takich pojazdów, pomimo wyższej ceny zakupu. Trend zastępowania pojazdów konwencjonalnych przez pojazdy z napędem alternatywnym jest silniejszy z roku na rok między innymi ze względu na świadome i nastawione proekologicznie społeczeństwo.

Bibliography / bibliografia

1. A.R. Miller, K.S. Hess, D.L. Barnes, T.L. Erickson, *System design of a large fuel cell hybrid locomotive*, *Journal of Power Sources*, Volume 173, Issue 2, 2007, Pages 935-942, ISSN 0378-7753, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.08.045>.
2. Arnold R. Miller, John Peters, Brian E. Smith, Omourtag A. Velev, *Analysis of fuel cell hybrid locomotives*, *Journal of Power Sources*, Volume 157, Issue 2, 2006, Pages 855-861, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2005.12.051>.
3. D'Ovidio G., Carpenito A., Masciovecchio C., Ometto A. *Preliminary Analysis On Advanced Technologies For Hydrogen Light-rail Train Application In Sub-urban Non Electrified Routes*, National Scientific Seminar SIDT, Politecnico di Bari, 14-15.09.2017. sidt.org/2017/wp-content/uploads/2018/02/1615-DOvidio.pdf
4. David J. Schroeder, Pradip Majumdar, *Feasibility analysis for solid oxide fuel cells as a power source for railroad road locomotives*, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 35, Issue 20, 2010, Pages 11308-11314, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.07.067>.
5. Dincer I., Zamfirescu, C. *A review of novel energy options for clean rail applications*, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, Volume 28, 2016, Pages 461-478, ISSN 1875-5100, <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.12.007>.
6. Furuta, R., Kawasaki, J., Kondo, K. (2010), *Hybrid Traction Technologies with Energy Storage Devices for Nonelectrified Railway Lines*. *IEEJ Trans Elec Electron Eng*, 5: 291-297. doi:10.1002/tee.20532
7. Hillmansen, S. (2003). *The application of fuel cell technology to rail transport operations*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 217(4), 291-298. <https://doi.org/10.1243/095440903322712900>
8. Hurst D., Wheelock C., *Hybrid locomotives technology innovations and demand drivers for diesel and all-electric locomotives, genset locomotives, and hybrid locomotives: market analysis and forecasts*. Research Report. Pike Research, 2010.
9. *Hybrid Locomotive, SUSTRAIL, Grant Agreement n°: 265740 FP7*.
10. Iraklis A., *Investigation into fully – electric and hybrid–electric powertrains for rolling stock*. Faculty of Electrical and Computer Engineering. Department of Electrical Energy Aristotle. University of Thessaloniki, Thessaloniki, 2015. (ikee.lib.auth.gr/record/291880/files/athanasios_iraklis_thesis.pdf)
11. Liping Guo, Karthik Yedavalli, Donald Zinger, *Design and modeling of power system for a fuel cell hybrid switcher locomotive*, *Energy Conversion and Management*, Volume 52, Issue 2, 2011, Pages 1406-1413, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2010.10.003>
12. Merkiż J., Pielecha I., *Układy elektryczne pojazdów hybrydowych*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2015.
13. Omar, N.; Daowd, M.; Hegazy, O.; Bossche, P.V.; Coosemans, T.; Mierlo, J.V. *Electrical Double-Layer Capacitors in Hybrid Topologies —Assessment and Evaluation of Their Performance*. *Energies* 2012, 5, 4533-4568.
14. Petronilla Fragiaco, Piraino Francesco, *Energy performance of a Fuel Cell hybrid system for rail vehicle propulsion*, *Energy Procedia*, Volume 126, 2017, Pages 1051-1058, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.08.312>.
15. Qi Li, Weirong Chen, Zhixiang Liu, Ming Li, Lei Ma, *Development of energy management system based on a power sharing strategy for a fuel cell-battery-supercapacitor hybrid tramway*, *Journal of Power Sources*, Volume 279, 1 April 2015, Pages 267-280, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2014.12.042>.
16. *Technologies and potential developments for energy efficiency and CO2 reductions in rail systems*. International Railways Union. Paris-Madrid 2016. www.uic.org
17. *UltraCap double layer capacitors. A New energy storage device for peak power applications*. www.epcos.com
18. *Ultracapacitor & supercapacitor*. www.tecategroup.com.
19. Upasana Sarma, Sanjib Ganguly, *Determination of the component sizing for the PEM fuel cell-battery hybrid energy system for locomotive application using particle swarm optimization*, *Journal of Energy Storage*, Volume 19, 2018, Pages 247-259, <https://doi.org/10.1016/j.est.2018.08.008>.
20. Wenbin Zhang, Jianqiu Li, Liangfei Xu, Minggao Ouyang, *Optimization for a fuel cell/battery/capacity tram with equivalent consumption minimization strategy*, *Energy Conversion and Management*, Volume 134, 15 February 2017, Pages 59-69, <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.11.007>.
21. Zhihu Hong, Qi Li, Ying Han, Weilin Shang, Yanan Zhu, Weirong Chen, *An energy management strategy based on dynamic power factor for fuel cell/battery hybrid locomotive*, *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 43, Issue 6, 2018, Pages 3261-3272, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.12.117>.