

Energy balance of the passenger rail vehicles

Bilans energetyczny pasażerskich pojazdów kolejowych

The paper presents a significant problem related to reasonable use of electric power by the Polish railway. A general principle serving for developing an energy balance is presented, particularly with reference to the traction vehicles. The use of specific energy consumption is emphasized, that enables comparing similar types of railway vehicles. The factors affecting the energy efficiency of the rail system are specified. In conclusion, the future measures allowing to improve this efficiency are itemized.

W artykule przedstawiony został istotny problem związany z racjonalnym wykorzystaniem energii elektrycznej przez polską kolej. Przedstawiona została ogólna zasada tworzenia bilansu energetycznego, a także jej odniesienie do pojazdów trakcyjnych. Podkreślono stosowanie jednostkowego zużycia energii jako narzędzia do porównania podobnego rodzaju pojazdów kolejowych. Zestawione zostały czynniki wpływające na efektywność energetyczną systemu kolei. Na zakończenie artykułu podano kierunki działań mających poprawić tę efektywność.

1. Introduction

The transport activity in the European metropolitan areas causes currently about 25% of total carbon dioxide (CO₂) air pollution in the European Union (EU) [1].

Taking additionally into account the air pollution caused by another toxic compounds and heavy traffic, it should be pointed out that these processes become a major problem in densely populated areas. One of the main goals of transport consists in improving the quality of the society life, taking into account the adverse transport effects, while ensuring, at the same time, that the benefits outweigh the unwanted effects. The rail transport (long-distance rail, high-speed city rail, metro, trams), thanks to high infrastructure capacity, high safety and relatively low polluting emissions to the environment, compared to the other transport means, is one of the solutions that is able to reduce the effect of people mobility on the environment [2].

Railway is the most efficient and low-emission transport mean. Nevertheless, possible range of improvement of the energy efficiency in this sector remains still considerable. The goals set up by the Centre of Railway Energy Efficiency for the rail transport in Poland include the savings in the form of reduction of the energy consumption on railways by 1.2 TWh by 2030. This also entails the CO₂ emission reduction by 1 million ton. Such an effect would be equivalent to planting 83 thousand hectares of the forests, covering the area of eight Białowieża National Parks [3].

1. Wstęp

Procesy transportowe zachodzące w obszarach europejskich metropolii są obecnie odpowiedzialne za około 25% całkowitego zanieczyszczenia powietrza dwutlenkiem węgla (CO₂) w Unii Europejskiej (EU) [1].

Jeśli dodatkowo uwzględnimy zanieczyszczenie powietrza innymi toksycznymi związkami oraz duże natężenie ruchu środków transportu, procesy te stają się głównym problemem na gęsto zaludnionych terenach. Jednym z głównych celów transportu jest poprawienie jakości życia społeczeństwa przy jednoczesnym uwzględnieniu skutków korzystania z niego, czyli żeby skutki nie przerosły korzyści. Transport szynowy (kolej dalekobieżna, szybka kolej miejska, metro, tramwaje), dzięki dużym zdolnościom przepustowym, wysokiemu bezpieczeństwu oraz stosunkowo niskiej emisyjności zanieczyszczeń do środowiska, w porównaniu z innymi gałęziami transportu, jest jednym z rozwiązań umożliwiających ograniczenie wpływu mobilności społeczeństwa na otoczenie [2].

Kolej jest najbardziej wydajnym i niskoemisyjnym środkiem transportu. Jednak wciąż jest duże pole do poprawy efektywności energetycznej tego sektora. Cele stawiane przed transportem szynowym w Polsce przez Centrum Efektywności Energetycznej Kolei to oszczędność w postaci zmniejszenia zużycia energii na kolei o 1,2 TWh do roku 2030, co oznacza także ograniczenie emisji CO₂ o 1 mln. ton. Taki efekt dałoby zasadzenie 83 tys. hektarów lasu, co równa się powierzchni ośmiu Białowieskich Parków Narodowych [3].



The CEEK goal:

To reduce the energy consumption by the railway within 10 years
1.2 TWh

2020 – enabling reduction of the emission 2030
1 million ton CO₂ 83 000 ha 8x

which is equivalent to planting eight Białowieża National Parks
This is achievable by

Recuperation Eco-driving Photovoltaics

Fig. 1. Visualization of the restriction in electric power consumption in the railways

Rys. 1. Wizualizacja efektu ograniczenia zużycia energii elektrycznej przez kolej

2. Energetic balance – the basic information

Formulation of the energy balance of the system consists in determining the amount of energy input, output and the increase in the energy of the system. The most general formulation of the first law of thermodynamics takes a form:

$$E_1 = E_u + E_2 \quad (1),$$

where:

- E_1 – sum of the energy supplied to the system [J]
- E_2 – sum of the energy carried away from the system [J]
- E_u – increase in the energy of the system [J].

The devices of continuous operation (i.e. flow exchangers, turbines, boilers) often occur in the thermal technology. In case of steady-state condition of such a device the energy balance referred to the time unit has a form:

$$E_1 = E_2 \quad (2).$$

The energy may be supplied to or carried away from the system by mechanical work, in the form of heat energy, electricity, and energy of a flowing agent.

In general it is accepted that the heat energy absorbed by a system is considered to be positive, while the returned heat energy is negative. The work done by the system is considered as positive, while the work supplied to the system as negative. This rule is shown in the figure below.

3. Energy balance of the rail vehicles

Optimal selection of the devices installed in a rail vehicle requires preparation of an appropriate energy balance. A list of all the devices inclusive of the values of their energy demand should be formulated for

2. Bilans energetyczny – podstawowe informacje

Sporządzenie bilansu energetycznego układu polega na określeniu ilości energii doprowadzonej, odprowadzonej oraz przyrostu energii układu. Najbardziej ogólne sformułowanie I zasady termodynamiki ma postać:

$$E_1 = E_u + E_2 \quad (1),$$

gdzie:

- E_1 - suma energii doprowadzonej do układu [J]
- E_2 - suma energii odprowadzonej z układu [J]
- E_u - przyrost energii układu [J].

W technice cieplnej często występują urządzenia działające w sposób ciągły (wymyennik przepływowy, turbina, kocioł). Jeżeli taki układ znajduje się w warunkach ustalonych, to bilans energetyczny odniesiony do jednostki czasu przybierze postać:

$$E_1 = E_2 \quad (2).$$

Energię do układu można doprowadzić lub odprowadzić za pomocą pracy mechanicznej, energii cieplnej, energii elektrycznej, energii strumienia czynnika.

Ogólnie przyjęto, że energię cieplną pochłoniętą przez układ uważa się za dodatnią, energię cieplną oddaną za ujemną. Pracę wykonaną przez układ traktuje się jako dodatnią, natomiast pracę doprowadzoną za ujemną. Regułę tę przedstawiono na poniższym rysunku.

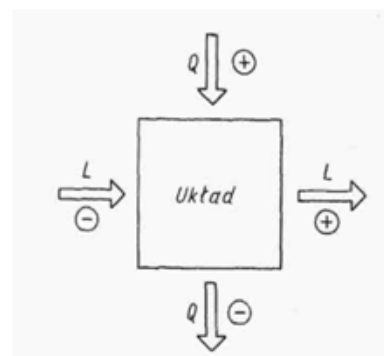


Fig. 2. Graphical illustration of the balance of the energy supplied and the work done (Q – energy, L – work)

Rys. 2. Graficzny obraz bilansu włożonej energii i wykonanej pracy (Q - energia, L - praca)

3. Bilans energetyczny w pojazdach kolejowych

W celu optymalnego doboru urządzeń zainstalowanych w pojeździe szynowym należy sporządzić odpowiedni bilans energetyczny, czyli zestawienie wszystkich urządzeń wraz z ich zapotrzebowaniem na energię. Definicja bilansu w energetyce i wszelkich innych naukach inżynierskich przedstawia się następująco: **"Bilans energetyczny przedstawia przepływ energii dla danego procesu technologicznego. W jego ramach zestawia się zapotrzebowanie energetyczne procesu i jego efekt"** [4].

W analizach dotyczących zużycia energii na cele transportowe stosuje się najczęściej wskaźnik jednostkowego zużycia energii, liczony w watogodzinach

this purpose. What concerns the energy industry and other engineering sciences, such a balance is defined as follows: "The energy balance represents the energy flow related to a given technological process. The energy demand of the process and its result are compiled within it." [4].

Within the analysis of the energy consumption for transport purposes, the specific energy consumption index is usually used. It is expressed in Watt-hours required for transportation of a unit gross mass (Wh/bt km) or of a thousand of the passengers (Wh/th.pass. km) on a given route.

The size of the unit energy consumption allows to compare the energy efficiency of similar vehicles. It is also used to analyze the factors affecting its consumption, and may serve as a basis for preliminary calculations of the power supply system [5].

The table below presents an example of power balance of a static converter for a four-car electric multiple unit manufactured by one of leading Polish manufacturers of the rolling stock.

potrzebnych na przewiezienie jednostkowej masy brutto na zadanej trasie (Wh/bt km) lub pasażerów (Wh/tys.pas. km).

Wielkość jednostkowego zużycia energii umożliwia porównanie podobnych pojazdów z punktu widzenia energooszczędności, służy także do analizy czynników wpływających na wielkość jego zużycia, jak również może być podstawą do wstępnych obliczeń układu zasilania [5].

Tablica poniżej przedstawia przykładowy bilans mocy przetwornicy statycznej dla czteroczołowego elektrycznego zespołu trakcyjnego produkcji jednego z czołowych polskich producentów taboru szynowego.

Moc przeznaczona na cele trakcyjne nowoczesnych pasażerskich zespolonych pojazdów szynowych eksportowanych i produkowanych w Polsce:

a) pojazdy produkcji PESA:

- 22WE – pojazd 4 członowy – 2,0 MW

- 27WE – pojazd 6 członowy – 3,2 MW

- 34WE – pojazd 2 członowy – 1,6 MW,

An example of power balance of a 4-car EMU
Przykładowy bilans mocy czteroczołowego e.z.t.

Table 1

Tabl. 1

Lp	Odbiorniki	Uzn	Izn	Ipmax	Pzn	Pmax	wsp ZPM	wsp Uż	Pśr[W]
1	wentylatory silników trakcyjnych	400	10,00	23,60	6920	34600	0,00	1,00	6920
2	ładowanie baterii	24	60,00	60,00	1440	1440	0,05	0,50	720
3	obw sterowania trakcyjnego	24	5,00	10,00	120	240	0,05	0,02	8
4	hamulce	24	5,00	5,00	120	120	0,02	0,90	108
5	napędy drzwiowe	24	5,00	5,00	120	120	0,01	0,30	36
7	oświetlenie wewnętrzne	24	31,30	40,00	751	960	0,01	1,00	753
8	oświetlenie zewnętrzne	24	15,22	20,00	365	480	0,01	1,00	366
9	ogrzewanie motorniczego z klimatyzacji**	400	7,50	9,00	5190	31140	0,01	1,00	5450
10	klimatyzacja maszynisty	400	3,50	24,50	2422	14532	0,01	1,00	2543
11	wentylatory wyciągowe	24	10,00	15,00	240	360	0,01	1,00	241
13	sygnalizacja dźwiękowa, lustra, wycieraczki	24	5,00	7,00	120	168	0,20	0,01	11
14	urządzenia rejestracji	24	1,00	1,50	24	36	0,20	1,00	26
15	tablice informacyjne	24	10,00	15,00	240	360	0,01	1,00	241
19	zasilanie sprężarki głównej	400	11	88	7612	45672	0,01	0,70	5709
20	zasilanie sprężarki pomocniczej	24	2	35	48	2500	0,00	0,01	0
21	zasilanie sterowników ogrzewania/klimatyzacji	24	25,83	25,83	620	620	0,00	1,00	620
22	Klimatyzacja pasażerów	400	28	196	19376	135632	0,02	1,00	21701,12
23	Ogrzewanie podstawowe przedz.pasaż.	400	45	50	31140	34600	0,00	1,00	31140
24	Gniazdo maszynisty	230	5	5	1150	1150	0,01	0,50	575
25	Wyłącznik szybki	24	5,00	30,00	120	720	0,00	0,10	12

[V]	[A]	[A]	[W]	[W]
230	5,0	5,0	1150	1150
24	180,4	269,3	4329	8124
400	73,50	356,60	50864	248194

1	Prąd znamionowy dla jednej fazy	78,50	A		
2	Moc znamionowa całej przetwornicy	58651	W		

- w tablicy ujęto tylko dane związane z poborem energii
- współczynnik ZPM - zwiększony pobór mocy

- in table 1 only data connected with energy consumption are included
- coefficient ZPM - increased power consumption

First line: Rated U, Rated I, I_{pmax}, Rated Power, Max Power, Coeff. ZPM, Coeff. use, Average Power [W]

*Left column: 1 - Traction engine fans, 2 - Battery charging, 3 - Traction control circuit, 4 - Brakes, 5 - Door driver, 7 - Interior lighting, 8 - Exterior lighting, 9 - Driver's heating from air conditioning**, 10 - Train driver's air conditioning, 11 - Exhaust fans, 13 - Acoustic signaling, mirrors, wipers, 14 - Registration devices, 15 - Information boards, 19 - Main compressor power supply, 20 - Auxiliary compressor power supply, 21 - Power supply of the heating/air conditioning controllers, 22 - Air conditioning of the passenger compartment, 23 - Main heating of the passenger compartment, 24 - Driver's socket, 25 - Speed breaker*

Left column below: 1 - Rated current of a single phase, 2 - Rated power of the whole converter

The power used for traction purposes of modern passenger multiple-unit vehicles operated and manufactured in Poland:

a) the vehicles manufactured by PESA:

- 22WE – 4-car unit – 2,0 MW
- 27WE – 6-car unit – 3,2 MW
- 34WE – 2-car unit – 1,6 MW,

b) the vehicles manufactured by NEWAG:

- 37WE – 2-car unit – 1,6 MW
- 36WE – 3-car unit – 1,6 MW
- 31WE – 4-car unit – 2,0 MW
- 45WE – 5-car unit – 2,0 MW
- 35WE – 6-car unit – 3,2 MW.

The amount of electric power consumption in rail transport is affected by many factors. Some of them depend on the solutions of the vehicle construction, infrastructure equipment and traffic organization, the others do not.

Among the factors independent of the vehicle structure and transport technology there are, among others, the route profile and weather conditions.

The factors dependent on the technology and construction of traction vehicles can be divided into two larger groups. The first one includes such features as the vehicle mass, resistance to motion, the energy conversion systems of the vehicle (main circuit, traction drive), and the electrotraction power supply (voltage and configuration of the power supply system). The other is related to traffic organization and management, inclusive of the energy-saving train operation, timetable, restrictions and disturbances in train movement, proper choice of a drive unit to the route, mass and speed of the train. Mass of the traction vehicle obviously affects consumption of the electric power. The higher the train mass, the greater the power consumption. Reduction of the vehicle mass is particularly important in case of suburban traffic, distinguished by large number of train stops, since each start-up of a relatively large train mass requires a large amount of energy. Therefore, minimization of the mass of traction vehicles becomes then particularly important. A part of the energy consumed by the vehicle is used to overcome the resistance of motion, hence, reduction of the resistance is conducive to smaller energy consumption [6].

b) pojazdy produkcji NEWAG:

- 37WE – pojazd 2 członowy – 1,6 MW
- 36WE – pojazd 3 członowy – 1,6 MW
- 31WE – pojazd 4 członowy – 2,0 MW
- 45WE – pojazd 5 członowy – 2,0 MW
- 35WE – pojazd 6 członowy – 3,2 MW.

Na wielkość zużycia energii elektrycznej w transporcie szynowym ma wpływ bardzo wiele czynników tak zależnych, jak i niezależnych od zastosowanych rozwiązań konstrukcji pojazdu, wyposażenia infrastruktury oraz organizacji ruchu.

Do czynników niezależnych od konstrukcji pojazdu i technologii przewozów możemy zaliczyć m. in. profil trasy oraz warunki klimatyczne

Czynniki zależne możemy podzielić na dwie większe grupy, związane z techniką, w tym konstrukcją pojazdów trakcyjnych (masa, opory) oraz ich wyposażeniem w układy przekształcania energii w pojeździe (obwód główny, napęd trakcyjny), a także zasilaniem elektrotrakcyjnym (napięcie i konfiguracja systemu zasilania); organizacją i zarządzaniem, w tym: energooszczędnym prowadzeniem pociągu, rozkładem jazdy, ograniczeniami i zakłóceniami w ruchu pociągów, doбором ciągnika do trasy, masy i prędkości. Masa pojazdów trakcyjnych ma oczywisty wpływ na zużycie energii elektrycznej – im większa jest masa pociągu, tym większe jest zużycie energii. Zmniejszenie masy pojazdów jest szczególnie istotne w ruchu podmiejskim przy liczbie zatrzymań pociągów, gdyż każdy rozruch stosunkowo dużej masy pociągu wymaga poboru dużej ilości energii. Dlatego też minimalizacja masy pojazdów trakcyjnych nabiera tu szczególnego znaczenia. Część energii pobieranej przez pojazd zużywane jest na pokonanie oporów ruchu, zmniejszanie oporów oznacza zatem zmniejszanie zużycia energii [6].

4. Działania mające na celu poprawę efektywności energetycznej transportu szynowego.

W ostatnich latach problemom racjonalizacji zużycia energii w transporcie kolejowym poświęca się w świecie wiele uwagi, a różne organizacje, w tym UIC organizowały projekty, spotkania i konferencje dedykowane tej tematyce. Wśród czterech priorytetów między innymi projektu [8] istotna była sprawność energetyczna. Dlatego postawiono wymagania, aby podczas procedury przetargowej zakupu nowego lub modernizacji taboru podawać:

4. The measures aimed at improving the energy efficiency of rail transport

In recent years the problems of rationalization of energy consumption in rail transport are with due attention considered in the world. Many organizations, inclusive of UIC, have organized the projects, meetings and conferences dedicated to this topic. The energy efficiency was among the four priorities specified, among others, in the project [8]. Therefore, it is required during the tender procedure aimed at purchasing new or modernized rolling stock to specify the following:

- mass of the vehicles;
- efficiency of energy conversion In the vehicles;
- energy consumption of the vehicle (the calculation carried out by the manufacturer) corresponding to adopted traffic conditions;
- fuel consumption of the vehicle equipped with a diesel engine or other similar specification;
- the management or control system of energy consumption for non-traction needs.

In order to ensure easier systematization and assessment of the rail transport with regard to the environmental impact, the UIC Code No. 330 has been developed [7]. The Code specifies the restrictions and guidelines for collecting and processing the data of various degrees of detail and reliability. The functional indexes defined in the Code shall enable to assess and compare the functioning of various means of transport, as they will relate to the transportation tasks expressed in [pas. km] or [t km].

Among the six basic indexes (shown in the figure below) characterizing operation of the railway with respect to the environmental impact, only two are related to energy:

- energy consumption;
- the sources of renewable energy;
- CO₂ emission;
- air pollution;
- noise;
- ground occupation.

These indexes are also an essential component of the policy for sustainable transport, through:

- increase in the energy efficiency (reduction of specific energy consumption);
- increase in the use and share of renewable energy (both in case of electric and diesel transport).

Significance of the energy indexes will be important both for the rolling stock operators and infrastructure. The Code also presents the stages of determination of the indexes and the required level of accuracy of the process, according to the way and method of their determination, as well as the level of analysis [7]. The figures below present the stages of the index analysis process.

- masy pojazdów,
- sprawności przetwarzania energii w pojazdach,
- zużycia energii dla pojazdu (obliczenia dostarczane przez producenta) dla zadanych warunków ruchu,
- zużycia paliwa w pojazdach spalinowych lub innych odpowiednich specyfikacji,
- systemu zarządzania lub sterowania zużyciem energii na potrzeby nieatrakcyjne.

W celu ułatwienia usystematyzowania oceny transportu szynowego ze względu na oddziaływanie na środowisko została opracowana karta UIC nr 330 [7]. W karcie tej określono ograniczenia oraz wytyczne do zbierania i przetwarzania danych o różnym stopniu szczegółowości i wiarygodności. Zdefiniowane w karcie wskaźniki funkcjonalne będą pozwalały na ocenę i porównanie funkcjonowania różnych środków transportu, gdyż odnosić się będą do pracy przewozowej wyrażonej w [pas. km] lub [t km].

Wśród sześciu podstawowych wskaźników (rysunek poniżej), charakteryzujących funkcjonowanie kolei, w aspekcie oddziaływania na środowisko tylko dwa dotyczą energii:

- zużycie energii
- dział zasobów energii odnawialnej
- emisja CO₂
- zanieczyszczenie powietrza
- hałas
- zajętość terenu.

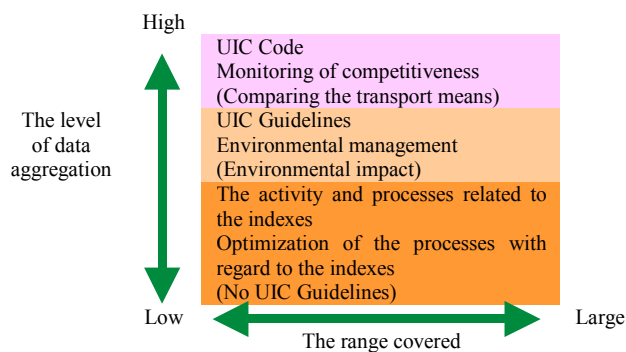
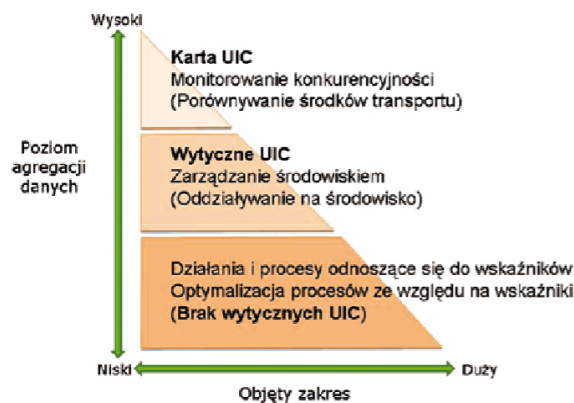


Fig. 3. The railway operation indexes

Rys. 3. Wskaźniki funkcjonowania kolei

Proces	Poziom dokładności		
	podstawowy	prosty	zaawansowany
A. Kategoryzacja danych	Dane szacowane (wstępnie)	Częściowo szacowane/częściowo z pomiarów	Dane z pomiarów
B. Agregacja	Dane uśrednione dla całości taboru	Dane szczegółowe dla pewnego typu ruchu	Dane szczegółowe dla typu ruchu
C. Cykle zbioru danych	Nieregularne	Prawie regularne (roczne)	Regularne i coroczne
D. Procedury zbioru danych	Brak standardowych procedur	Ograniczone, niestandardizowane procedury	W pełni udokumentowane i standaryzowane procedury
E. Ocena jakości (danych i procedur)	Częściowa wewnętrzna weryfikacja i walidacja danych	Wewnętrzna weryfikacja i walidacja danych	Wewnętrzna weryfikacja i walidacja danych poparta zewnętrzną oceną

Process	Accuracy level		
	basic	simple	advanced
A. Data categorization	Estimated data (preliminary)	Partially estimated/partially measured	Measured data
B. Aggregation	Averaged data for the whole rolling stock	Detailed data for a certain traffic type	Detailed data for a traffic type
C. Cycles of data collection	Irregular	Nearly regular (yearly)	Regular and yearly
D. Procedures of data collection	No standard procedures	Limited non-standard procedures	Fully documented and standardized procedures
E. Quality check (data and procedures)	Partial internal data verification and validation	Internal data verification and validation	Internal data verification and validation supported by an external assessment

Zużycie energii	Poziom		
	podstawowy	prosty	zaawansowany
Wskaźnik 1.1 Końcowe zużycie energii (mierzone na odbieraku ew. na przyłączy podstacji lub w GPZ)	Szacunki na podstawie systemu rozliczeń zużycia energii przez tabor pasażerski i towarowy	Szacunki na podstawie zużycia energii dla poszczególnych kategorii pociągów	Pomiar na wszystkich pojazdach
Wskaźnik 1.2 Zużycie energii pierwotnej z uwzględnieniem strat (wytwarzania, transformacji, przesyłu itp.)	Obliczenia zużycia – wykorzystanie szacunkowych uśrednionych wskaźników	Stosowanie dokładnych wskaźników oraz pomiar strat	Uszczegółowione wskaźniki

Process	Accuracy level		
	basic	simple	advanced
A. Data categorization	Estimated data (preliminary)	Partially estimated/partially measured	Measured data
B. Aggregation	Averaged data for the whole rolling stock	Detailed data for a certain traffic type	Detailed data for a traffic type
C. Cycles of data collection	Irregular	Nearly regular (yearly)	Regular and yearly
D. Procedures of data collection	No standard procedures	Limited non-standard procedures	Fully documented and standardized procedures
E. Quality check (data and procedures)	Partial internal data verification and validation	Internal data verification and validation	Internal data verification and validation supported by an external assessment

Fig. 4. The stages of index analysis

Rys. 4. Etapy procesu analizy wskaźników

Index 1.1 highlights the energy efficiency of electric traction allowing, at the same time, to support the policy of further reduction of energy consumption for traction purposes, with consideration of non-traction needs and shunting. The consumption should be best

Wskaźniki te stanowią także istotny element polityki zrównoważonego rozwoju transportu poprzez:

- zwiększanie efektywności energetycznej (zmniejszanie jednostkowego zużycia energii)
- zwiększanie wykorzystania i udziału energii odnawialnej (zarówno dla transportu elektrycznego, jak i spalinowego).

Znaczenie wskaźników energetycznych dla firm kolejowych będzie istotne zarówno dla operatorów taboru, jak i infrastruktury.

W karcie podano także etapy wyznaczania wskaźników oraz wymagany poziom dokładności ich wyznaczania w zależności od procesu i sposób ich wyznaczania, a także w zależności od poziomu analiz [7]. Na rysunkach poniżej przedstawiono etapy procesu analizy wskaźników.

Wskaźnik 1.1 podkreśla energooszczędność trakcji elektrycznej, jednocześnie pozwalając wpływać na politykę dalszego zmniejszania zużycia energii w trakcji, z uwzględnieniem potrzeb nietrakcyjnych i ruchu manewrowego. Najlepiej mierzyć zużycie bezpośrednio w pojeździe, dlatego w nowoczesnych pojazdach szynowych montuje się liczniki zużycia energii. Wskaźnik 1.2 służy do porównań różnych środków transportu. W Karcie 330 podano także typowe wielkości jednostkowego zużycia energii (jze) dla:

a) ruchu pasażerskiego:

- $jze = 0,1 \div 0,15$ kWh/pas km – trakcja elektryczna
- $jze = 0,25 \div 0,4$ kWh/pas km – trakcja spalinowa

b) ruchu towarowego:

- $jze = 0,03 \div 0,05$ kWh/t km – trakcja elektryczna
- $jze = 0,1 \div 0,25$ kWh/t km – trakcja spalinowa.

Zwykle przyjmuje się, że zużycie energii pierwotnej jest 2÷3 razy większe niż energii zmierzonej na odbieraku prądu. W trakcji elektrycznej wytworzenie 1 kWh energii elektrycznej wymaga zużycia ok. 0,433 kg paliwa umownego (kpu – energia elektryczna z paliw kopalnych), czyli 1 kpu dostarcza 2,3 kWh energii trakcyjnej, co przy koszcie 0,5 zł/kWh daje

measured directly in the vehicle, therefore, the modern rail vehicles are provided with energy meters. The index 1.2 is used to compare various transport means. The Code 330 also specifies typical amounts of Specific Energy Consumption (SEC) for:

- a) passenger traffic:
 - SEC = 0,1±0,15 kWh/pass. km – electric traction
 - SEC = 0,25±0,4 kWh/pass. km – diesel traction
- b) freight traffic:
 - SEC = 0,03±0,05 kWh/t km – electric traction
 - SEC = 0,1±0,25 kWh/t km – diesel traction.

An assumption is adopted that the primary energy consumption is 2-3 times higher than the energy measured on the pantograph. In case of the electric traction in order to generate 1 kWh of electric energy approx. 0.433 kg of coal equivalent is needed (kce - electricity from fossil fuels). Hence, 1 kce provides 2.3 kWh of the traction energy. Taking into account the cost of 0.5zł/kWh it gives 1.15 zł/kce. On the other hand, 1 kg of diesel oil corresponds to 1.45 kce, i.e. 1 kce is equivalent to 0.689 kg of diesel oil. Its cost of 5 zł/kg gives 3.45 zł/kce. Therefore, assuming the above, the cost of 1 kce in diesel traction is about 3.5 times higher than that in electric traction [8].

The 330 Code introduced also the index 2: *the share of renewable energy in total energy consumption in passenger and freight transport*. It determines the amount of the pollution introduced by transport to the environment.

The energy mix from renewable sources in Poland, arranged by its origin, was predominated by the solid biofuels (68.1%). These were followed by wind energy (14.2%), liquid biofuels (10.1%), biogas (3.1%) and water energy (2.4%). Increase in the share of renewable energy in gross final energy consumption is an objective of the energy policy of the European Union. This also applies to Poland, that should achieve 15% of the share in 2020. Moreover, it is assumed that by 2020 the share of energy from renewable sources shall account for at least 10% of the energy consumed in transport. [9].

The indexes 2 should be determined under specific assumptions, e.g. related to the average speed and distance between stops for passenger trains, as shown in the figure below.

The purpose of the use of the indexes

Electric power stations	The share of renewable energy	Substation	Substation	CO ₂ , NO _x , particles
		Electric freight traction	Electric passenger traction	
Fuel delivery	Fuel quality	Diesel freight traction	Diesel passenger traction	Noise/Ground occupancy

The stations, buildings and other infrastructure parts not subjected to the UIC 330 Code

Fig. 6. The purpose of the energy indexes on the railways

1,15 zł/kpu. Z kolei 1 kg oleju napędowego odpowiada 1,45 kpu, czyli 1 kpu jest równoważne 0,689 kg oleju napędowego, co przy koszcie 5 zł/kg daje 3,45 zł/kpu. Zatem dla przyjętych założeń koszt 1 kpu w trakcji spalinowej jest ok. 3,5 razy wyższy niż w trakcji elektrycznej [8].

Karta 330 wprowadziła także wskaźnik 2: *udział energii odnawialnej w całkowitym zużyciu w transporcie pasażerskim i towarowym*. Wskazuje on na ilość zanieczyszczeń wprowadzanych do środowiska przez transport.

W strukturze pozyskania energii ze źródeł odnawialnych według rodzajów nośników dominowały w kraju biopaliwa stałe (68,1%), a w dalszej kolejności: energia wiatru (14,2%), biopaliwa ciekłe (10,1%), biogaz (3,1%) oraz energia wody (2,4%). Zwiększenie udziału energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto jest elementem polityki energetycznej Unii Europejskiej, w tym Polski, dla której ustanowiono w tym zakresie cel na poziomie 15% do osiągnięcia w 2020 r. Ponadto, zakłada się, że udział energii ze źródeł odnawialnych we wszystkich rodzajach transportu będzie wynosił do 2020 r. co najmniej 10% zużycia energii w transporcie[9].

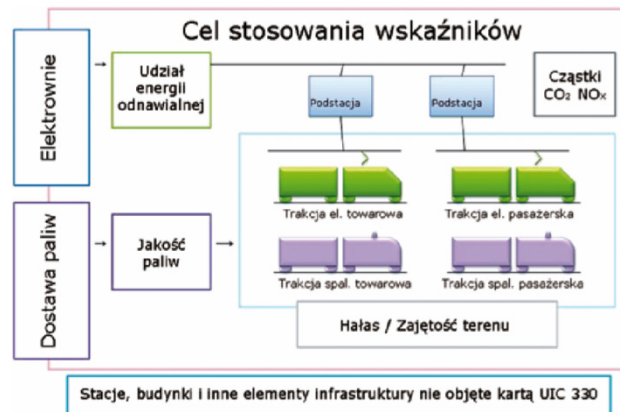
Wskaźniki 2 należy wyznaczać przy określonych założeniach, np. dotyczących średniej prędkości i odległości między postojami dla pociągów pasażerskich, co obrazuje poniższy rysunek.

Rodzaj ruchu	Uwagi	Średnia prędkość handlowa [km/h]	Średnia odległość między postojami [km]
Podmiejski	Jednostki trakcyjne	40÷60	2÷5
Regionalny	Jednostki oraz składy lokomotywowe	50÷90	5÷15
Intercity	Jednostki oraz składy lokomotywowe	70÷110	15÷50
Szybkie pociągi	Zespoły dla dużych prędkości	130÷200	40÷200

Traffic type	Notes	Average journey speed [km/h]	Average distance between stops [km]
Suburban	Multiple units	40÷60	2÷5
Regional	Multiple units and locomotive-hauled trains	50÷90	5÷15
Intercity	Multiple units and locomotive-hauled trains	70÷110	15÷50
High-speed trains	High-speed rail units	130÷200	40÷200

Fig. 5. Operational parameters of various types of the traction units

Rys.5. Parametry eksploatacyjne różnych rodzajów pojazdów trakcyjnych



Rys. 6. Cel stosowania wskaźników energetycznych na kolei

The purpose of the energy and environmental indexes is illustrated in the figure below.

5. Conclusions and challenges put before the transport sector in the upcoming years

The development of knowledge and technology enable the rolling stock manufacturers to optimize consequently their products with a view to reduce the energy consumption of rail vehicles.

The use of modern drives using the IGBT elements significantly reduces the energy consumption of the electric vehicles for the traction purposes. Therefore, replacement or modernization of the already used rolling stock becomes necessary, allowing to reduce significantly the energy consumption by calculating the LCC costs.

It is necessary to use the comparable energy indexes, that becomes possible by application of the guidelines of the UIC 330 Code.

Introduction of new technologies to the market, such as hybrid or hydrogen fueled vehicles, raises a great potential and also a new challenge.

At the TRAKO2019 Fairs, NEWAG demonstrated the first hybrid vehicle [10]. In March 2020 the Company submitted an offer in the tender to the Lower Silesia Province for this type of rolling stock.

In the case of hydrogen powered vehicles, PESA has signed an agreement with ORLEN for joint development of the locomotives that may be powered by the hydrogen cells.

Such bottom-up initiatives must be supported "from above" through co-financing and rapid development of technical requirements and standards, so as to enable not only the development, but also to obtain appropriate certificates allowing to provide the transport work by these innovative vehicles.

5. Wnioski i wyzwania stawiane przed sektorem transportowym w nadchodzących latach

Rozwój wiedzy oraz rozwój technologiczny pozwala obecnie producentom taboru na konsekwentną optymalizację swoich produktów w celu obniżenia zużycia energii przez pojazdy szynowe.

Zastosowanie nowoczesnych napędów na elementach IGBT znacząco obniża pobór energii na cele trakcyjne przez pojazdy elektryczne.

Konieczna jest zatem wymiana lub modernizacja wysłużonego już taboru, co pozwoli poprzez obliczenie kosztów LCC znacząco obniżyć zużycie energii.

Konieczne jest stosowanie porównywalnych wskaźników energetycznych, a taką możliwość stwarza stosowanie wytycznych zawartych w karcie UIC 330.

Duży potencjał, ale i wyzwania stanowi wprowadzenie na rynek nowych technologii, takich jak pojazdy hybrydowe lub zasilane paliwem wodorowym.

Na tragach TRAKO2019 NEWAG zademonstrował pierwszy pojazd hybrydowy [10], a w 03.2020 złożył ofertę w przetargu dla województwa Dolnośląskiego na tego rodzaju tabor.

W przypadku pojazdów zasilanych wodorem PESA podpisała umowę ze spółką ORLEN na prowadzenie wspólnego rozwoju napędu dla lokomotyw, które mogą być zasilane ogniwami wodorowymi.

Takie inicjatywy oddolne muszą być wspierane „odgórnie” poprzez dofinansowanie i szybki rozwój wymagań i norm technicznych, żeby możliwy był nie tylko rozwój, ale i uzyskanie odpowiednich certyfikatów uprawniających do prowadzenia pracy przewozowej przez te innowacyjne pojazdy.

Bibliography / Bibliografia

- [1] *European Commission, Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a competitive and resource efficient transport system. Dostęp on-line 03.04.2017. <http://eur-lex.europa.eu/legalcontent/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:52011DC0144&from=EN>*
- [2] *Friedrich R., Bickel P.: Environmental external costs of transport. Springer, Stuttgart 2013, pp. 11-18.*
- [3] *Raport Kolejowy 06/2019: CEEK. „Polityka efektywności energetycznej”.*
- [4] *https://pl.wikipedia.org/wiki/Bilans_energetyczny*
- [5] *Analiza efektywności technicznej hamowania rekuperacyjnego wagonów METROPOLIS seria TC/M produkcji ALSTOM w aspekcie możliwości obecnego zasilania w Metrze Warszawskim. Warszawa, 2000.*
- [6] *Szeląg A.: Zwiększanie efektywności energetycznej transportu szynowego. Technika Transportu Szynowego 12/2008*
- [7] *Karta UIC 330*
- [8] *Porównanie kosztów eksploatacji kolejowych pojazdów trakcji spalinowej i pojazdów trakcji elektrycznej. Praca wykonana na zlecenie PKP Energetyka sp. z o.o. ZTE IMG PW. 2006.*
- [9] *Wskaźniki zielonej gospodarki w Polsce 2019. Urząd Statystyczny w Białymstoku. Podlaski Ośrodek Badań Regionalnych. 2019 r.*
- [10] *Raport Kolejowy 06/2019. Pociągi hybrydowe coraz śmieiej wjeżdżają na tory.*