

*mgr Krystian Woźniak*  
*dr inż. Maciej Andrzejewski*  
*ŁUKASIEWICZ – Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”*  
*dr inż. Łukasz Rymaniak*  
*Politechnika Poznańska*

## Fuel and electric energy consumption measurement of vehicles

### Pomiary zużycia paliwa i energii elektrycznej pojazdów

*The article presents methods for measuring fuel consumption and electricity used in tests of rolling stock, buses, trolleybuses and trams. Based on the results of the performed experiments, the limitations of currently used research methods have been described and possible solutions have been proposed.*

*W artykule przedstawiono metody pomiaru zużycia paliwa i energii elektrycznej stosowane w badaniach taboru kolejowego, autobusów, trolejbusów oraz tramwajów. Na podstawie zebranych doświadczeń opisano ograniczenia stosowanych obecnie metod badawczych i wskazano możliwe rozwiązania.*

#### 1. INTRODUCTION

One of the criteria taken into account by rail operators when choosing rolling stock is the vehicle energy consumption. Costs of energy required for the operation of vehicles intended for passenger transport have a significant impact on the profitability of the venture and the price paid for the service by the passenger. For the most part, these vehicles are purchased through tenders announced by local governments and companies with the State Treasury shareholding. In many cases, the tender procedure requires the declaration of vehicle energy consumption. Often, the manufacturer's declared energy consumption values can only be verified during a test drive after the vehicle has been already delivered. This solution has one fundamental disadvantage. In practice, it is difficult to annul the entire proceeding after the tender and delivery of the vehicle, and if the purchase is financed from EU funds, there is a threat of losing EU funding. An overview of the methods used to measure energy consumption for different types of rolling stock is described in the further part of the study.

#### 1. RAIL VEHICLES

Requirements related to equipping vehicles with on-board energy measuring devices are given in chapter 4.2.8.2.8 **TSI LOC&PAS (1302/2014)** [1], which applies to all rolling stock excluding local transport services on functionally separated railway systems. The basic functions that should be met by the system are included in Appendix D. Detailed technical solutions in this aspect are described in the norm **EN 50463-2:2012** [2], which is referred to in Appendix J of the aforementioned **TSI**. The entire **EMS (Energy Measurement System)** consists of the measurement

#### 1. WSTĘP

Jednym z kryteriów branych pod uwagę przez przewoźników przy wyborze taboru jest zużycie energii. Szczególnie podczas eksploatacji pojazdów przeznaczonych do przewozu pasażerów koszty związane z energią mają znaczący wpływ na rentowność przedsięwzięcia i cenę jaką za usługę zapłaci pasażer. W przeważającej części pojazdy te zamawiane są w trybie przetargów ogłaszanych przez jednostki samorządowe i spółki z udziałem Skarbu Państwa. W wielu przypadkach postępowanie przetargowe zawiera wymóg zadeklarowania zużycia energii. Często deklarację producenta można sprawdzić dopiero podczas jazdy testowej po dostarczeniu pojazdu. Takie rozwiązanie ma jedną podstawową wadę. W praktyce trudno jest już po rozstrzygnięciu przetargu i dostarczeniu pojazdu unieważnić całe postępowanie a w sytuacji, gdy zakup finansowany jest ze środków unijnych, istnieje groźba utraty wsparcia wspólnotowego. Przegląd stosowanych metod pomiaru zużycia energii dla różnych typów taboru opisano w dalszej części opracowania.

#### 2. TABOR KOLEJOWY

Wymagania związane z wyposażeniem pojazdów w pokładowe urządzenia do pomiaru energii podane są w pkt. 4.2.8.2.8 **TSI LOC&PAS (1302/2014)** [1], obejmujące tabor kolejowy z wyłączeniem przewozów lokalnych na wyodrębnionych funkcjonalnie systemach kolei. Podstawowe funkcje jakie powinien spełniać system zawiera dodatek D. Szczegółowe rozwiązania techniczne w tym zakresie opisane są w normie **EN 50463-2:2012** [2], do której odwołuje się dodatek J wspomnianego **TSI**. Cały system pokładowego pomiaru energii **EMS (Energy Measurement System)** składający się z funkcji pomiaru **EMF (Energy Measurement Function)**, obróbki **DHS (Data Handling**

function **EMF** (Energy Measurement Function), data processing **DHS** (Data Handling System), the transmission and collection of data **DCS** (Data Collection Service) are described in the other parts of the standards from the **EN 50463** series. The basic functions of the **EMS** system were shown on Fig. 1.

The system's task is to measure the energy collected and transferred to the **CL** (Contact Line), network for management and monitoring purposes. This system does not include energy released in the form of heat on braking resistors. Such a case may take place in the electrodynamic braking process, where for specific voltage parameters the recovered energy cannot be returned to the traction network. Therefore, to more accurately determine the energy consumption, the measuring system should be extended by this very element.

In practice, a set of apparatus with a higher accuracy class is assembled, in particular because the energy returned to the resistors in the recuperation process is impulsive and for precise measurements it is necessary to use higher sampling frequencies. These tests can be performed as part of the determination of traction parameters during which locomotives, using the tensometric coupling visible in Fig. 2, also measure the traction force on the hook.

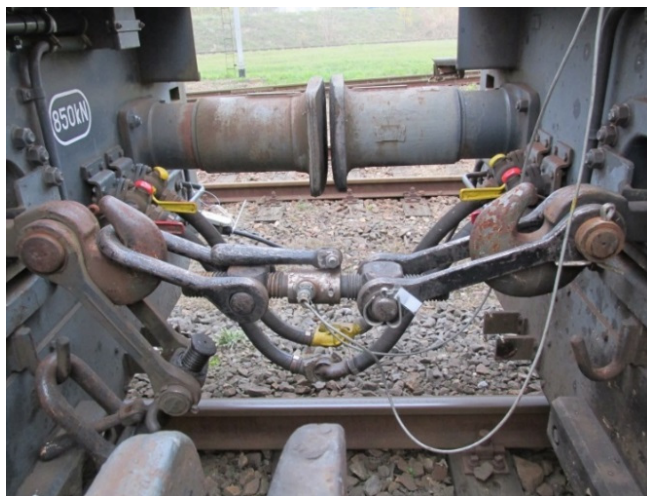


Fig. 2. Tensometric coupling for force measurement on the locomotive hook

Rys. 2. Tensometryczny sprzęg do pomiaru siły na haku lokomotywy.

With a precisely designed measuring system the measurement conditions can be defined more accurately. The general requirements given in point 9.3 of **EN 50215:2009** [3], which indicate the need to specify such route parameters as:

- the length, slope and radius of the arches of the railway line,
- vehicle stops and their duration,
- the maximum travel speed permitted on the specified sections,
- power supply voltage parameters for the traction network,

System), przesyłania i gromadzenia danych **DCS** (Data Collection Service) opisują pozostałe części norm z serii **EN 50463**. Założenia działania systemu **EMS**, przedstawiono na rys. 1.

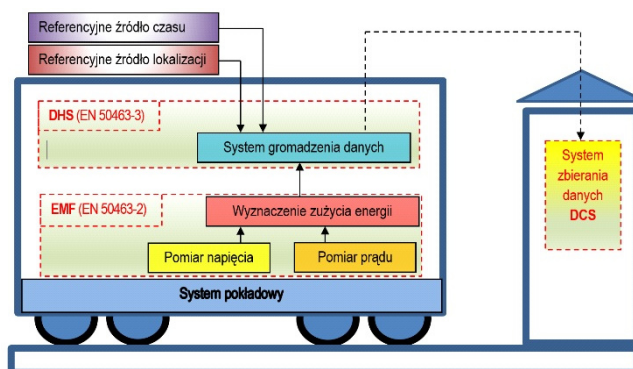


Fig. 1. EMS system function chart

Rys. 1. Schemat blokowy działania systemu EMS

Zadaniem systemu jest pomiar energii pobranej i oddanej do sieci **CL** (Contact Line), do celów zarządzania i rozliczeń. System ten nie uwzględnia energii wydzielanej w postaci ciepła na rezystorach hamowania. Taki przypadek może mieć miejsce w procesie hamowania elektrodynamicznego, podczas którego dla określonych parametrów napięcia energia nie może być oddawana do sieci trakcyjnej. W związku z tym aby dokładniej określić zużycie energii, układ pomiarowy należy rozbudować o ten właśnie element.

W praktyce, montowany jest komplet aparatury o wyższej klasie dokładności w szczególności dlatego, że energia oddawana do rezystorów w procesie rekuperacji ma charakter impulsowy i dla precyzyjnych pomiarów niezbędne jest stosowanie wyższych częstotliwości próbkowania. Testy te można wykonać w ramach wyznaczenia parametrów trakcyjnych, podczas których dla lokomotyw, przy pomocy tensometrycznego sprzęgu widocznego na rys. 2, mierzona jest również siła pociągowa na haku.

Mając już precyzyjnie zaprojektowany układ pomiarowy, można przystąpić do doprecyzowania warunków pomiarów. W tym punkcie pomocne okażą się ogólne wymagania podane w pkt. 9.3 normy **EN 50215:2009** [3], które wskazują na konieczność określenia takich parametrów trasy jak:

- długość, nachylenie oraz promień łuków linii kolejowej,
  - zatrzymania i czasy ich trwania,
  - maksymalną dozwoloną prędkość na wyspecyfikowanych odcinkach,
  - parametry napięcia zasilnia sieci trakcyjnej,
  - możliwość hamowania odzyskowego na linii,
- oraz konfiguracji pociągu:
- obciążenie pojazdu (lub dla lokomotyw masę brutto haku),
  - liczbę osi,
  - współczynnik bezwładności dla mas wirujących,

- regenerative braking feasibility on the given rail line,
- as well as for train configuration:
- vehicle load (or for locomotives gross weight measured on the hook),
  - number of axles,
  - inertia coefficient for rotating masses,
  - traction characteristics,
  - braking force curves,
  - maximum acceleration and its changes,
  - maximum braking power,
  - type of driving (manual or automatic).

The interior of electric multiple units after being loaded with ballast in the form of concrete blocks and cast iron weights when determining its traction parameters is shown in Fig. 3.

This norm also includes the option of performing fuel consumption tests for vehicles with internal combustion engines. In such a case, the characteristics of fuel and lubricants should be determined.

There have also been attempts to standardize the measurement conditions. Ready-made test drive scenarios can be found in the annexes to the **CLC/TS 50591:2013** [4] specification. They include four profiles for passenger traffic and one for freight traffic. The main features of the profiles are summarized in Table 1.

- charakterystyki trakcyjne,
- krzywe siły hamowania,
- maksymalne przyspieszenie i jego zmiany,
- maksymalną siłę hamowania,
- rodzaj jazdy (manualna lub automatyczna).

Widok wnętrza elektrycznych zespołów trakcyjnych obciążonych balastem w postaci betonowych bloczków i żeliwnych ciężarków podczas wyznaczania parametrów trakcyjnych przedstawiono na rys. 3.



Fig. 3. Electrical traction units loaded with ballast for testing traction properties

Rys. 3. Elektryczne zespoły trakcyjne obciążone balastem podczas badań właściwości trakcyjnych

Table 1. Drive profile parameters according to the CLC/TS 50591:2013 specification [4]

Tabela 1. Cechy profili jazdy według specyfikacji CLC/TS 50591:2013 [4]

Nazwa profilu	Dystans [km]	Czas przejazdu [min]	Prędkość max. [km/h]	Ilość zatrzymań podczas jazdy	Profil trasy, max. wzniesienie [m]
Podmiejski	40	40	120	10	0
Regionalny	70	61	140	13	0
Międzymiastowy	250	159	200	8	0
Wysokiej prędkości	300	107	300	1	0
Towarowy linii głównych	300	253	100	5	340
Profile name	Distance [km]	Drive duration [min]	Maximum speed [km/h]	Number of stops	Route profile, max. elevation [m]
Suburban	40	40	120	10	0
Regional	70	61	140	13	0
Intercity	250	159	200	8	0
High speed	300	107	300	1	0
Main line freight	300	253	100	5	340

The specification also includes standardized tables to precisely document the test conditions, including, among others, the characteristics of the infrastructure, the power supply network, data on the train while driving and at a stop and the climate zone in which the route is located.

Performing energy consumption measurements in real conditions in line with the procedures described above is very difficult as a result of the infrastructure limitations. The test track available in Poland in Żmigród allows travel at a speed of 160 km/h only on a short stretch of the route, and on curves the speed is limited to 120 km/h. The infrastructure of PKP PLK S.A. on the other hand, makes it difficult to find long sections of track with the correct track

Norma ta uwzględnia również możliwość realizacji testów zużycia paliwa dla pojazdów spalinowych. W takim przypadku należy określić charakterystykę paliwa oraz materiałów smarnych.

Powstały również próby ustandaryzowania warunków pomiaru. Gotowe scenariusze jazdy testowych znajdziemy w załącznikach do specyfikacji **CLC/TS 50591:2013** [4]. Obejmują one cztery profile jazdy dla ruchu pasażerskiego i jeden dla ruchu towarowego. Główne cechy profili zestawiono w Tabeli 1.

Specyfikacja ta zawiera również ustandaryzowane tabele służące do precyzyjnego udokumentowania warunków testów, wśród nich między innymi charakterystykę infrastruktury, sieci zasilającej, dane o pojeździe podczas jazdy i na postoju oraz strefy klima-

characteristic such as small slope changes and a suitable permissible speed. In addition, the drive itself may vary depending on the traffic situation and the test drive can easily be disrupted by a poorly timed railway signal.

### 3. BUSES

#### 3.1. DIESEL buses

Activities aimed at the standardization of fuel consumption tests in buses began in the late 1990s. In the initial phase, the focus was on developing basic drive cycles and fuel measurement methods for DIESEL buses. In 2013, the International Union of Public Transport **UITP** (Union Internationale des Transports Public), connecting organizers and public transport operators, policy makers, scientific institutions and representatives of industry and service providers, agreed on this issue and published the document: >> UITP project „**SORT**” Standardized cycles of drive tests << [5]. The basic cycles are intended for mapping the typical character of driving the vehicle, consisting of the engine starting phase, driving at a constant speed, braking and stopping. So defined bus driving characteristic takes the shape of trapezoids. Depending on the type of the test route, three types of cycles have been defined: SORT 1 - difficult urban conditions, SORT 2 - easy urban conditions and SORT 3 - easy suburban conditions. The main parameters of the cycles are given in Table 2.

Table 2. Main SORT test parameters

Parametr	SORT 1	SORT 2	SORT 3
Prędkość średnia $V_c$ (km/h)	12,1	18	25,3
Liczba zatrzymań na kilometr	5,8	3,3	2,1
Czas zatrzymań [%]	39,7	33,4	20,1
Trapez 1 stała prędkość [km/h] / długość [m]	20/100	20/100	30/200
Minimalne przyspieszenie [ $m/s^2$ ]	1,03	1,03	0,77
Trapez 2 stała prędkość [km/h] / długość [m]	30/200	40/220	50/600
Minimalne przyspieszenie [ $m/s^2$ ]	0,77	0,62	0,57
Trapez 3 stała prędkość [km/h] / długość [m]	40/220	50/600	60/650
Minimalne przyspieszenie [ $m/s^2$ ]	0,62	0,57	0,46
Czasy zatrzymań [s]	20/20/20	20/20/20	20/10/10
Droga całkowita s [m]	520	920	1 450
Opóźnienie hamowania [ $m/s^2$ ] (dla wszystkich trapezów)	0,8	0,8	0,8
Czas obliczeniowy [s]	154,5	183,9	206,2

The parameters have been shown visually, based on the example of the SORT 2 cycle, in Figs. 4 and 5.

As in the case of **CLC/TS 50591:2013** [4], the **SORT** [5] procedure defines the conditions for testing. The parameters of the test site, weather, measurement equipment, bus configuration (including weight of the load), the measurement process and the

tycznej, na której położona jest trasa.

W warunkach rzeczywistych realizacja pomiarów zużycia energii według opisanych wyżej programów jest bardzo trudna i wynika z ograniczeń leżących po stronie infrastruktury. Dostępny w Polsce tor doświadczalny w Żmigrodzie umożliwia jazdę z prędkością 160 km/h wyłącznie na krótkim odcinku trasy, a na łukach prędkość ograniczona jest do 120 km/h. Z kolei na infrastrukturze PKP PLK S.A. trudno jest znaleźć odpowiednio długie odcinki linii kolejowych z profilem trasy o niewielkich zmianach nachylenia i odpowiedniej prędkości dopuszczalnej. Ponadto realizacja jazd uzależniona jest od sytuacji ruchowej i próbe może zniweczyć jeden „pomarańczowy semafor”.

### 3. TABOR AUTOBUSOWY

#### 3.1. Autobusy DIESLA

Działania mierzące do standaryzacji testów zużycia paliwa w autobusach zapoczątkowano w końcu lat 90-tych. W początkowej fazie skupiono się na opracowaniu cykli bazowych i metody pomiaru zużycia paliwa dla autobusów DIESLA. W roku 2013 Międzynarodowa Unia Transportu Publicznego **UITP** (Union Internationale des Transports Public), łącząca organizatorów oraz operatorów transportu publicznego, decydentów politycznych, instytucje naukowe oraz przedstawicieli przemysłu i dostawców usług porozumiała się w tej kwestii i opublikowała dokument: >> Projekt UITP „**SORT**” Znormalizowane cykle testów jezdnych << [5]. Cykle bazowe mają za zadanie odwzorowanie typowego charakteru jazdy, składającego się z fazy ruszania, jazdy ze stałą prędkością, hamowania oraz zatrzymania. Tak zdefiniowany charakter jazdy autobusów przyjmuje kształt trapezów. W zależności od typu trasy zdefiniowano trzy rodzaje cykli: SORT 1 - utrudnione warunki miejskie, SORT 2 - łatwe warunki miejskie oraz SORT 3 - łatwe warunki podmiejskie. Podstawowe parametry cykli podano w Tabeli 2.

Tabela 2. Podstawowe parametry cykli SORT

Parametr	SORT 1	SORT 2	SORT 3
Prędkość średnia $V_c$ (km/h)	12,1	18	25,3
Liczba zatrzymań na kilometr	5,8	3,3	2,1
Czas zatrzymań [%]	39,7	33,4	20,1
Trapez 1 stała prędkość [km/h] / długość [m]	20/100	20/100	30/200
Minimalne przyspieszenie [ $m/s^2$ ]	1,03	1,03	0,77
Trapez 2 stała prędkość [km/h] / długość [m]	30/200	40/220	50/600
Minimalne przyspieszenie [ $m/s^2$ ]	0,77	0,62	0,57
Trapez 3 stała prędkość [km/h] / długość [m]	40/220	50/600	60/650
Minimalne przyspieszenie [ $m/s^2$ ]	0,62	0,57	0,46
Czasy zatrzymań [s]	20/20/20	20/20/20	20/10/10
Droga całkowita s [m]	520	920	1 450
Opóźnienie hamowania [ $m/s^2$ ] (dla wszystkich trapezów)	0,8	0,8	0,8
Czas obliczeniowy [s]	154,5	183,9	206,2

Graficzne zobrazowanie parametrów, na przykładzie cyklu SORT 2, przedstawiono na rys. 4 i 5.

criteria for accepting the results are very precisely defined. In practice, the best place to carry out this type of tests are airport runways, where the slope of the road is negligible. In order to compensate for the impact of wind, drives are carried out in both directions. Figure 6 shows the 18-meter DIESEL bus, ready to commence tests at one of the airports in Wielkopolska.

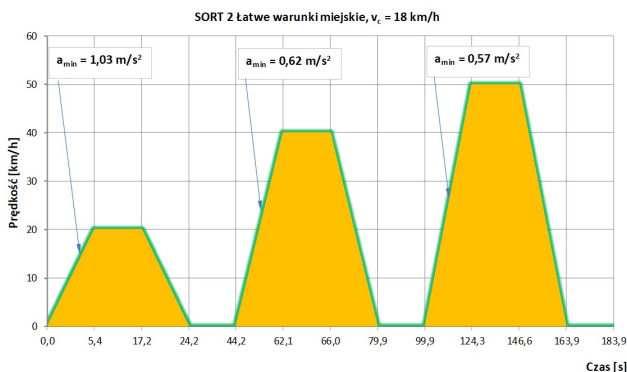


Fig. 4. SORT 2 test cycle, graph of speed as a function of time

Rys. 4. Cykl SORT 2, wykres prędkości w funkcji czasu



Fig. 6. DIESEL bus during testing drive cycles at the Pila airport

Rys. 6. Autobus DIESELA podczas jazd testowych na lotnisku w Pile

A set of equipment is used for the tests, which includes, among others, a fuel flow meter and a digital recorder (shown in Fig. 7), devices for measuring the distance, speed and acceleration of the vehicle, as well as fuel temperature sensors.

### 3.2. Electric buses

In 2014, a new edition of the “SORT” UTIP project [6] was published, combined with requirements for the intensively developing technology of hybrid buses. During the same period, fully electric buses started to appear on the market from manufacturers. Nevertheless, no standardized principles for measuring electricity consumption have been developed for them. Due to the urgent need for test standardization, for public procurement purposes, in May 2015 IPS “TABOR” developed the PB-23 test procedure [7] the study of electricity consumption of electric buses. In subsequent years, the procedure PB-23 [7] was used in tender proceedings for the supply of electric buses to several Polish cities and municipalities.

Podobnie jak w przypadku specyfikacji CLC/TS 50591:2013 [4] procedura SORT [5] definiuje warunki realizacji testów. Bardzo precyzyjnie określone są parametry miejsca wykonania sprawdzeń, pogoda, aparatura pomiarowa, konfiguracja autobusu (w tym masa obciążenia), proces pomiaru oraz kryteria akceptacji wyników. W praktyce najlepszym miejscem do przeprowadza tego typu testów są pasy startowe lotnisk, gdzie nachylenie toru jazdy jest pomijalne. W celu kompensacji wpływu wiatru, przejazdy wykonywane są w obu kierunkach. Na rysunku 6 przedstawiono 18-metrowy autobus DIESELA, gotowy do rozpoczęcia prób na jednym z lotnisk na terenie Wielkopolski.

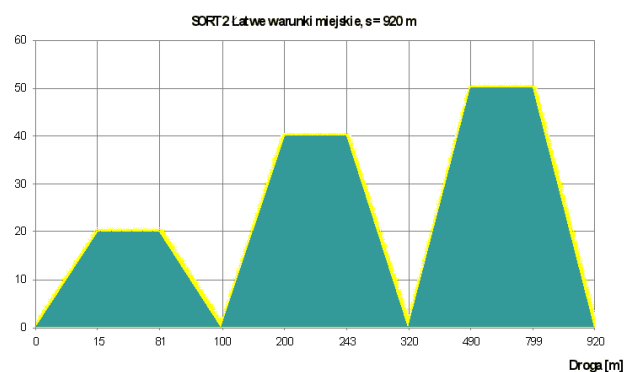


Fig. 5. SORT 2 test cycle, graph of speed as a function of the distance

Rys. 5. Cykl SORT 2, wykres prędkości w funkcji drogi

Do badań wykorzystywany jest zestaw aparatury, w skład którego wchodzi między innymi przepływomierz paliwa i cyfrowy rejestrator (widoczne na rys. 7), urządzenia do pomiaru drogi, prędkości i przyspieszenia oraz czujniki temperatury paliwa.



Fig. 7. Equipment used for measuring fuel consumption

Rys. 7. Aparatura do pomiaru zużycia paliwa

During the tests described in **PB-23** [7] the total energy  $E_c$  used by the bus is calculated, which is the sum of the energy consumed from batteries  $E_z$  and the energy  $E_0$  recovered during the recuperation process in accordance with the following equation:

$$E_c = E_z + \eta * E_0 \quad (1)$$

where:

$E_z$  – electricity consumed from batteries [VAs],

$E_0$  – electricity delivered to the batteries [VAs],

$\eta$  – battery charging energy efficiency, value given by the battery manufacturer, in the case where this parameter is not provided, the value of 80% is taken, and a notice is given in the test report.

The electric energy  $E_z$  consumed from the batteries is calculated using:

$$E_z = \sum_{t=0}^n U_z * I_z * \Delta t \quad (2)$$

where:

$U_z$  – voltage at the battery output [V],

$I_z$  – current drawn from the battery (with a positive sign) [A],

$\Delta t$  – sampling interval [s],

$n$  – number of samples calculated as the quotient of time divided by the sampling frequency for the current flowing out of the battery (with a positive sign).

The electrical energy  $E_0$  returned to the battery is calculated from the equation:

$$E_0 = \sum_{t=0}^n U_0 * I_0 * \Delta t \quad (3)$$

where:

$U_0$  – voltage at the battery output [V],

$I_0$  – current flowing into the battery (with a negative sign) [A],

$\Delta t$  – sampling interval [s],

$n$  – number of samples calculated as the quotient of time divided by the sampling frequency for the current flowing into the battery (with a negative sign).

Determining the total electric energy balance  $E_B$  is done using the formula:

$$E_B = \frac{E_c}{1000 * 3600 * S_n} \quad (4)$$

where:

$E_B$  – total electric energy balance [kWh/km],

$S_n$  – SORT test cycle distance [km].

The energy measurement point  $E_c$  is shown in Figure 8. With an experienced driver and in favorable weather conditions, measurements carried out using this method for three types of SORT cycles are possible to perform in a single day. Figure 9 shows an example of  $E_c$  energy consumption graphs for two driving directions recorded during tests for the SORT 2 cycle.

### 3.2. Autobusy elektryczne

W roku 2014 ukazało się nowe wydanie Projektu UTIP „SORT” [6] wzbogacone o wymagania dla intensywnie rozwijającej się technologii autobusów hybrydowych. W tym samym okresie w ofercie producentów zaczęły pojawiać się autobusy w pełni elektryczne. Mimo to, nie wypracowano dla nich jednolitych zasad pomiaru zużycia energii elektrycznej. W związku z pilną potrzebą standaryzacji testów, na potrzeby zamówień publicznych, w maju 2015 IPS „TABOR” opracował procedurę **PB-23** [7] Badania zużycia energii elektrycznej autobusów elektrycznych. W kolejnych latach procedura **PB-23** [7] została wykorzystana w postępowaniach przetargowych na dostawy autobusów elektrycznych do kilku polskich miast.

Podczas testów opisanych w **PB-23** [7] wyznaczana jest całkowita  $E_c$  pobierana przez autobus, która jest sumą energii pobieranej z baterii  $E_z$  i energii  $E_0$  oddawanej podczas procesu rekuperacji zgodnie z niżej wymienioną zależnością:

$$E_c = E_z + \eta * E_0 \quad (1)$$

gdzie:

$E_z$  – energia elektryczna pobierana z baterii [VAs],

$E_0$  – energia elektryczna oddawana do baterii [VAs],

$\eta$  – sprawność energetyczna ładowania baterii, wartość podana przez producenta akumulatorów, w przypadku braku danych przyjmuje się wartość 80 %, z podaniem tej informacji w sprawozdaniu z badań.

Energia elektryczna  $E_z$  pobierana z baterii obliczana jest z zależności:

$$E_z = \sum_{t=0}^n U_z * I_z * \Delta t \quad (2)$$

gdzie:

$U_z$  – napięcie na wyjściu z baterii [V],

$I_z$  – prąd pobierany z baterii (ze znakiem dodatnim) [A],

$\Delta t$  – odstęp czasu próbkowania [s],

$n$  – liczba próbek obliczana, jako iloraz czasu przez częstotliwość próbkowania dla prądu wpływającego z baterii (ze znakiem dodatnim).

Energia elektryczna  $E_0$  oddawana do baterii obliczana jest z zależności:

$$E_0 = \sum_{t=0}^n U_0 * I_0 * \Delta t \quad (3)$$

gdzie:

$U_0$  – napięcie na wyjściu z baterii [V],

$I_0$  – prąd wpływający do baterii (ze znakiem ujemnym) [A],

$\Delta t$  – odstęp czasu próbkowania [s],

$n$  – liczba próbek obliczana, jako iloraz czasu przez częstotliwość próbkowania dla prądu wpływającego do baterii (ze znakiem

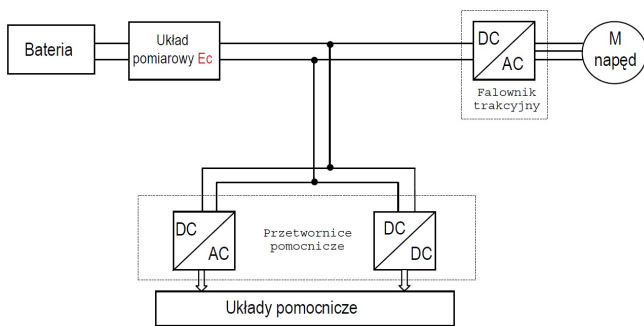


Fig. 8. The location of the energy measuring system  $E_c$   
Rys. 8. Miejsce zainstalowania układu pomiarowego do wyznaczenia energii  $E_c$

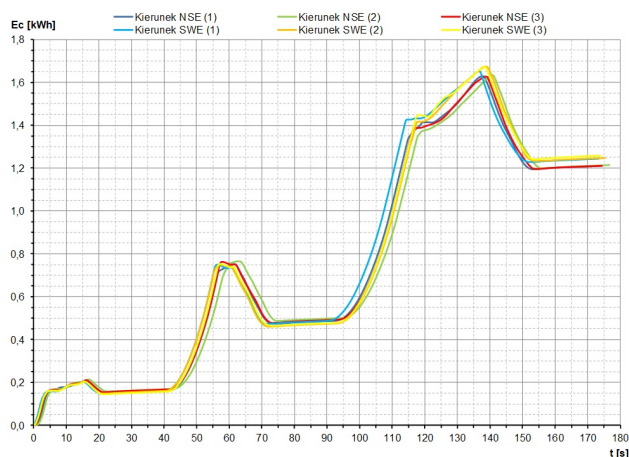


Fig. 9. The consumed energy  $E_c$  as a function of time determined based on SORT 2 test cycle

Rys. 9. Energia  $E_c$  w funkcji czasu wyznaczona dla cyklu SORT 2

It is necessary to consider one more factor to determine the total energy consumption that is necessary for transports operated by electric buses. That being the efficiency of the charging system. In July 2017, the UIPT PROJECT **E-SORT** [8] procedure was published, supplemented with this charging stage. According to these requirements, the measurement process is carried out in the following steps:

1. Determining the energy consumption in a given  $SORT_i$  cycle:

$$c_i \left[ \frac{kWh}{100 km} \right] = \frac{100E_i}{d_i} \quad (5)$$

where:

- $c_i$  – energy consumption in the  $SORT_i$  cycle [kWh/100 km],
- $E_i$  – energy measured in the  $SORT_i$  cycle [kWh],
- $d_i$  – distance measured in the  $SORT_i$  cycle [km].

2. Determining the maximum range in the  $SORT_i$  cycle:

$$d_{Max}^i = \frac{100E_c^{Max}}{c_i} = \frac{E_c^{Max}}{E_i} * d_i \quad (6)$$

where:

- $E_c^{Max}$  – energy measured at the output of the charging station [kWh], (measure-

ujemnym).

Wyznaczenie bilansu energii elektrycznej całkowitej  $E_B$  oblicza się z poniższej zależności:

$$E_B = \frac{E_c}{1000 * 3600 * S_n} \quad (4)$$

gdzie:

$E_B$  – bilans energii elektrycznej całkowitej [kWh/km],

$S_n$  – długość cyklu SORT [km].

Miejsce pomiaru energii  $E_c$  pokazano na rys. 8.

Z doświadczonym kierowcą oraz przy sprzyjających warunkach pogodowych pomiary realizowane tą metodą dla trzech rodzajów cykli SORT możliwe są do wykonania w ciągu jednego dnia. Na rysunku 9 przedstawiono przykładowy wykres zużycia energii  $E_c$  dla dwóch kierunków jazdy zarejestrowanych podczas testów dla cyklu SORT 2.

Do wyznaczenia całego zużycia energii, która jest niezbędna do przewozów obsługiwanych przez autobusy elektryczne trzeba uwzględnić jeszcze jeden czynnik. Sprawność systemu ładowania. W lipcu 2017 r. opublikowano procedurę UIPT PROJECT **E-SORT** [8], uzupełnionej o ten właśnie etap. Według tych wymagań proces pomiaru realizowany jest w następujących krokach:

1. Wyznaczenie zużycia energii w danym cyklu  $SORT_i$ :

$$c_i \left[ \frac{kWh}{100 km} \right] = \frac{100E_i}{d_i} \quad (5)$$

gdzie:

- $c_i$  – zużycie energii w cyklu  $SORT_i$  [kWh/100 km],
- $E_i$  – energia zmierzona w cyklu  $SORT_i$  [kWh],
- $d_i$  – dystans zmierzony w cyklu  $SORT_i$  [km].

2. Wyznaczenie maksymalnego zasięgu w cyklu  $SORT_i$ :

$$d_{Max}^i = \frac{100E_c^{Max}}{c_i} = \frac{E_c^{Max}}{E_i} * d_i \quad (6)$$

gdzie:

- $E_c^{Max}$  – energia zmierzona na wyjściu stacji ładowania [kWh], (pomiar od minimalnego do maksymalnego stanu naładowania),
- $d_{Max}^i$  – maksymalny zasięg w cyklu  $SORT_i$  [km].

3. Wyznaczenie sprawności stacji ładowania:

$$\eta_c [\%] = \frac{E_c^{Max}}{E_G^{Max}} \quad (7)$$

gdzie:

- $E_G^{Max}$  – energia zmierzona na wejściu stacji ładowania [kWh], (pomiar od minimalnego do maksymalnego stanu naładowania).

4. Wyznaczenia zużycia energii uwzględniającego **TCO** (Total Cost of Ownership), całkowity koszt pozyskania (przykład):

ment from the minimum to the maximum state of charge),  
 $d_{Max}^i$  – maximum range in the SORT<sub>i</sub> cycle [km].

3. Determining the charging station efficiency:

$$\eta_c[\%] = \frac{E_G^{Max}}{E_G^{Max}} \quad (7)$$

where:

$E_G^{Max}$  – energy measured at the charging station input [kWh], (measurement from minimum to maximum charge state).

4. Determining the energy consumption taking into account the **TCO** (Total Cost of Ownership), the cost of acquisition (example):

$$C[\text{€}] = \frac{(e_i[\text{kWh}/100\text{km}] * L[\text{years}] * K[\frac{\text{km}}{\text{year}}] * p[\text{€}/(\text{kWh}/\text{h})])}{\eta_c[100\%]} \quad (8)$$

where:

L – bus service life,  
 K – mean bus mileage during the service life,  
 p – the average price of electricity.

This method makes it possible to estimate the costs of electricity consumption by the bus throughout its entire life cycle. It must be kept in mind, however, that the values calculated in this way are subject to considerable level of uncertainty. During the measurement of energy consumption  $c_i$  in a given SORT cycle, all auxiliary systems on the bus are switched off except for the systems necessary to safely drive the vehicle. Energy consumed by heating, ventilation, air conditioning, monitoring systems, ticket machines, internal passenger information system and interior lighting is thus not taken into account. In addition, the **E-SORT** procedure does not specify issues related to the propulsion system optimization in the given vehicle used for testing, for example increasing the hysteresis for switching the cooling of the propulsion system, which may have a significant impact on the measured result. The software versions of the tested vehicle and the one delivered to the end user should be identical.

#### 4. TROLLEYS AND TRAMS

The problems of the electricity consumption measurement method standardization for trolleybuses and trams result from the need to carry out tests on the existing infrastructure, which is adapted to the topographic conditions of the given area. Therefore, it is not possible to provide a sufficiently long, straight and flat section of the route. Experimental test drives were carried out on the infrastructure owned by Przedsiębiorstwo Komunikacji Trolejbusowej Sp. z

$$C[\text{€}] = \frac{(e_i[\text{kWh}/100\text{km}] * L[\text{years}] * K[\frac{\text{km}}{\text{year}}] * p[\text{€}/(\text{kWh}/\text{h})])}{\eta_c[100\%]} \quad (8)$$

gdzie:

L – czas resursu autobusu,  
 K – średni przebieg autobusu w czasie resursu,  
 p – średnia cena energii elektrycznej.

Zastosowanie tej metody umożliwia oszacowanie kosztów zużycia energii elektrycznej przez autobus w całym cyklu jego eksploatacji. Trzeba jednak pamiętać, że wyliczone tym sposobem wartości obciążone są znaczną niepewnością. Podczas pomiarów zużycia energii  $c_i$  w danym cyklu SORT w autobusie wyłączono wszystkie odbiorniki za wyjątkiem systemów niezbędnych do sterowania pojazdem. Energia pobierana przez układy ogrzewania, wentylacji, klimatyzacji, monitoringu, biletomaty, wewnętrzny system informacji pasażerskiej oraz oświetlenia wewnętrznego nie jest uwzględniana. Ponadto procedura **E-SORT** nie precyzuje zagadnień związanych z optymalizacją układu napędowego w egzemplarzu autobusu dostarczanego na testy, na przykład zwiększeniu histerezy załączania chłodzenia układu napędowego, co może mieć istotny wpływ na wynik pomiaru. Wersje oprogramowania badanego pojazdu i dostarczanego do użytkownika powinny być identyczne.

#### 4. TROLEJBUSY I TRAMWAJE

Problemy ustandaryzowania metody pomiarów zużycia energii elektrycznej dla trolejbusów i tramwajów wynikają z konieczności realizacji testów na istniejącej infrastrukturze, która dostosowana jest do warunków topograficznych terenu. W związku z tym nie ma możliwości zapewnienia odpowiednio długiego, prostego i płaskiego odcinka trasy. Eksperymentalne jazdy testowe przeprowadzono na infrastrukturze Przedsiębiorstwa Komunikacji Trolejbusowej Sp. z o.o. w Gdyni i realizowano w oparciu o metodologię procedury **PB-23** [7]. Widok trolejbusu przed wyjazdem na próbę przedstawiono na rys. 10.



Fig. 10. Trolley before driving tests

Rys. 10. Trolejbus przed testami w Gdyni



o.o. in Gdynia and implemented based on the methodology of **PB-23** procedure [7]. The trolley before starting its test drive is shown in Fig. 10.

Despite the drive test measurements having been scheduled for the night hours, performing a full test cycle with a sequence of stops and rides at a constant speed still proved to be very difficult, which was influenced by other traffic participants and the traffic lights at intersections.

## 5. CONCLUSIONS

The increase in energy prices, which could be observed in recent months, along with not very optimistic perspectives on the change of this trend, will inevitably lead to an increasingly more strict monitoring of energy consumption of rolling stock by operators, as well as increased interest in determining the parameters of new vehicles as ordered from manufacturers. It is recommended to carry out the verification of the technical data provided by the manufacturer at the testing stage and in the case of electric multiple units, with a slight increase in inputs. This measurement can be combined with other tests, for example when determining traction parameters, brake testing or the interaction of pantograph with the catenary. Standardized test methods described in this document, both for rolling stock and buses, need clarification. In Polish conditions, due to the requirements for drive characteristics and speed, the implementation of some of the test drive scenarios given in the **CLC/TS 50591:2013** [4] specification could prove very difficult. The SORT test procedures, on the other hand, in the description of the method and standard documentation, omit a very important issue related to documenting the version of the propulsion system software and the main driver, which may affect the energy consumption of the vehicle.

Pomimo organizacji pomiarów w godzinach nocnych wykonanie pełnego cyklu testowego z sekwencją zatrzymań i jazd ze stałą prędkością okazało się bardzo trudne, na co wpływ mieli inni uczestnicy ruchu i działająca sygnalizacja świetlna na skrzyżowaniach.

## 5. PODSUMOWANIE

Wzrost cen energii, który obserwujemy w ostatnich miesiącach i niezbyt optymistyczne perspektywy na zmianę tego trendu, wpłyną na coraz baczniejsze przyglądanie się przez przewoźników zużyciu energii przez tabor i określania parametrów z tym związanych dla nowych zamówień. Weryfikacja danych technicznych zadeklarowanych przez producenta wskazana jest do przeprowadzenia na etapie badań typu i w przypadku elektrycznych zespołów trakcyjnych, przy nieznacznym zwiększeniu nakładów, można ją połączyć z innymi badaniami, na przykład przy wyznaczaniu parametrów trakcyjnych, badań hamulca, czy współpracy odbieraków z siecią. Znormalizowane metody badań opisane w niniejszym opracowaniu, zarówno dla taboru kolejowego jak i autobusów, wymagają doprecyzowania. W warunkach polskich, z uwagi na wymagania dla profilu i prędkości, realizacja części scenariuszy jazd testowych podanych w specyfikacji **CLC/TS 50591:2013** [4] byłaby bardzo trudna. Z kolei ogólnie rozumiane procedury SORT, w opisie metody i standardowych arkuszach dokumentujących testy, pomijają bardzo istotną kwestię związaną z udokumentowaniem wersji oprogramowania układu napędowego i sterownika głównego, które mogą mieć wpływ na zużycie energii przez pojazd.

*The content and issues discussed in this article have been partly presented previously in [9].*

*Treści zawarte w niniejszym artykule zostały częściowo przedstawione na konferencji [9].*

## BIBLIOGRAPHY / BIBLIOGRAFIA

- [1] Rozporządzenie Komisji (UE) NR 1302/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznej interoperacyjności odnoszącej się do podsystemu „Tabor – lokomotywy i tabor pasażerski” systemu kolei w Unii Europejskiej,
- [2] EN-50463-2:2012. Railway applications – Energy measurement on board trains – Part 2: Energy measuring,
- [3] EN-50215:2009. Railway applications – Rolling stock – Testing of rolling stock on completion of construction and before entry into service,
- [4] CLC/TS 50591:2013. Specification and verification of energy consumption for railway rolling stock,
- [5] SORT (D) Projekt UITP „SORT”, Znormalizowane cykle testów jezdnych, UITP, 2013,
- [6] SORT (D + H) UITP Project „SORT” Standardised On-Road Test Cycles. New edition UITP 2014,
- [7] PB-23. Badania zużycia energii elektrycznej autobusów elektrycznych. Wydanie 02. IPS „TABOR” Poznań, maj 2015 r.
- [8] E-SORT. UITP PROJECT E-SORT, Cycles for electric vehicles, July 2017.
- [9] Woźniak K., Andrzejewski M., Daszkiewicz P., Rymaniak Ł.: Badania zużycia energii przez pojazdy w warunkach rzeczywistych. XXVIII Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy Eksploatacji Maszyn i Napędów Elektrycznych”. Rytro, 22–24.05.2019.