

Rail Vehicles quarterly is covered by the patronage  
of the Transport Committee of the Polish Academy of Science  
Kwartalnik Pojazdy Szynowe objęty jest patronatem  
Komitetu Transportu Polskiej Akademii Nauk

ISSN 0138-0370

Contents/Spis treści

Nr 4/2020

<i>Bolzhelarskiy Y., Dovahaniuk S., Urshuliak O., Daszkiewicz P.:</i> Traction tests of the special self-propelled rolling stock: aims, methods, experience and prospects (Badania trakcyjne specjalnego samobieżnego taboru kolejowego: cele, metody, doświadczenie i perspektywy) ....	1
<i>Durzyński Z.:</i> Current state and perspectives of non-electrified railway transport in Poland (part 2) (Stan obecny i perspektywy niezelektryfikowanego transportu kolejowego w Polsce (cz. 2)).....	12
<i>Andrzejewski M., Szerbart R., Skobiej K., Nowak M.:</i> Analysis of driver assistance systems in rail vehicles (Analiza systemów wspomagania prowadzącego w pojazdach szynowych ) .....	25
<i>Bajerlein M., Urbański P., Daszkiewicz P.:</i> Simulation tests of a VCR engine as a propulsion unit in rail vehicles (Badania symulacyjne silnika VCR jako jednostki napędowej w pojazdach szynowych) .....	33
<i>Licow R., Szablowska D.:</i> Assessment of acoustic climate in passenger space of EN57 series electric multiple unit (Ocena klimatu akustycznego w przestrzeni pasażerskiej elektrycznego zespołu trakcyjnego serii EN57).....	45

## **R a i l V e h i c l e s**

The scientific – technical quarterly journal dedicated to problems of designing,  
construction and researches of railway stock

## **P o j a z d y S z y n o w e**

Kwartalnik naukowo-techniczny poświęcony zagadnieniom konstrukcji,  
budowy i badań taboru szynowego

### Editorial/Redakcja:

Sieć Badawcza Łukasiewicz –  
Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”  
61-055 Poznań, Warszawska 181  
tel. 61 66-41-488 fax: 61-653-40-02  
mail: redakcja@tabor.com.pl

### Włodzimierz Gąsowski

(Editor-in-chief / Redaktor Naczelny)

### Włodzimierz Stawecki

(Vice-editor-in-chief / Z-ca Red. Naczelnego)

### Władysław Stankowski

(Editorial Secretary / Sekretarz Redakcji)

### Zbigniew Durzyński

(Science Editor / Redaktor Naukowy)

**Grażyna Barna, Zygmunt Giziński, Jerzy Madej,**

**Krzysztof Magnucki, Marian Medwid**

(Associate Editors / Redaktorzy Tematyczni)

### Krzysztof Magnucki

(Statistical Editor / Redaktor Statystyczny)

**Alicja Iwanowska, Jan Kalinowski, Jerzy Lewiński,**

**Katarzyna Zgodzińska, Joanna Tomaszewska**

(Proofreading Editors / Redaktorzy Językowi)

### Editor / Wydawca

ŁUKASIEWICZ Research Network –

Rail Vehicles Institute „TABOR”

Sieć Badawcza Łukasiewicz –

Instytut Pojazdów Szynowych „TABOR”

### Scientific Board / Rada Programowa

#### Chairman / Przewodniczący: Jerzy Merkisz

Andrzej Chudzikiewicz, Jan Czerwiński (Szwajcaria),  
Andrzej Fórmaniak (W. Brytania), Stanisław  
Guzowski, Tomasz Hueckel (USA), Evgeenj Kossov  
(Rosja), Valeriy Kuznetsov (Ukraina), Otmar Krettek  
(Niemcy), Nikolay Lukov (Rosja), Janusz Mielniczuk,  
Paweł Piec, Adam Szelaąg, Franciszek Tomaszewski,  
Mirosław Wyszyński (W. Brytania)

### Reviewers / Recenzenci

Grażyna Barna (Ł-TABOR), Zbigniew Durzyński  
(Ł-TABOR), Włodzimierz Gąsowski (Ł-TABOR),  
Iwona Grabarek, Andrzej Grzyb, Marek Idzior, Marian  
Kaluba (Ł-TABOR), Ewa Kardas-Cinal, Krzysztof  
Magnucki (Ł-TABOR), Marian Medwid (Ł-TABOR),  
Janusz Mielniczuk (Ł-TABOR), Marian Ostwald,  
Tadeusz Piechowiak, Marek Sobaś (Ł-TABOR),  
Adam Szelaąg, Antoni Świątek, Eugeniusz Świtoński,  
Krzysztof Zboiński, Wiesław Zwierzycki

**Print/Druk:** Zakład Poligraficzny „GRAFIKA”  
61-062 Poznań, ul. Leszka 22  
tel. (061) 876 89 08

### Projekt okładki : Hanna Stawecka

- \* All articles published in the quarterly are reviewed / Wszystkie artykuły zamieszczone w kwartalniku są recenzowane
- \* Editorial team reserves the right to shorten the received articles / Redakcja zastrzega sobie prawo dokonywania skrótów nadesłanych artykułów
- \* Editorial team does not return the articles which were not ordered / Artykułów nie zamówionych redakcja nie zwraca
- \* The original version of the journal is the printed version. An electronic version is also available / Pierwotną wersją czasopisma jest wersja drukowana, dostępna jest również wersja elektroniczna
- \* Editorial team is not responsible for the content and the form of advertisements / Za treść i formę ogłoszeń redakcja nie odpowiada
- \* The editors take care of maintaining the ethical standards in scientific publications and take all steps against the negligence and failures in this area / Redakcja dba o utrzymanie standardów etycznych w publikacjach naukowych i podejmuje wszelkie kroki przeciwko zaniedbaniom i uchybieniom w tym zakresie
- \* The author makes a statement aimed at preventing ghostwriting/guest authorship practices / Autor składa oświadczenie, którego celem jest zapobieganie praktykom ghostwriting/guest authorship.

Artykuły z czasopisma rejestrowane są w bazie danych **BAZTECH** zawierającej polskie opracowania techniczne : [www.baztech.icm.edu.pl](http://www.baztech.icm.edu.pl)



oraz

Polskiej Bazie Cytowań



Czasopismo indeksowane w międzynarodowej bazie **IC Journal Master List-Index Copernicus**

**ICV 2019 = 73,57**

[www.indexcopernicus.com](http://www.indexcopernicus.com)

**Yaroslav Bolzhelarskyi**

**Stepan Dovhaniuk**

**Oleksandr Urshuliak**

*Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazarian*

**Paweł Daszkiewicz**

*Łukasiewicz – IPS „TABOR”*

## **Traction tests of the special self-propelled rolling stock: aims, methods, experience and prospects**

### **Badania trakcyjne specjalnego samobieżnego taboru kolejowego: cele, metody, doświadczenie i perspektywy**

*Methods and results of experimental determination of the two most important parameters for traction calculations of the DGK-type speeder are given in the article. The first parameter is the specific acceleration, i.e. acceleration from the action of unit of force per unit of weight of the train. The second one is the specific rolling resistance. The results can be used to determine these parameters for different types of OTM.*

*W artykule podane zostały metody i wyniki eksperymentalnego określania dwóch najważniejszych parametrów do obliczeń trakcyjnych samobieżnego pojazdu typu DGK (spalinowy pojazd inspekcyjny). Pierwszym parametrem jest przyspieszenie, tj. przyspieszenie liczone z działania jednostki siły na jednostkę masy pociągu. Drugim są opory ruchu. Wynik może być wykorzystany do określenia tych parametrów dla różnego typu OTM (on Track Machines).*

#### **1. INTRODUCTION**

Special self-propelled rolling stock (railroad speeders, maintenance of rail vehicles etc.) is a separate kind of railway rolling stock, which is referred in TSI [1] to the group of ‘On track machines (OTMs)’. OTMs are used in different spheres of railways’ production activity and consume a considerable amount of energy resources. Besides, railway accidents occur with OTMs, as well as with other types of rolling stock. To identify the reasons of these accidents, expert study is conducted. In both cases, it is necessary to carry out traction calculations. In the first case, their purpose is to identify the reasonable operation modes, and in the second – to reveal the mechanism of the railway accident and the possibility of its prevention.

#### **2. PROBLEM STATEMENT**

The theory of traction calculations has come a long way of evolution in the countries of the former USSR, from the first works of the 19<sup>th</sup> century [2] to the modern developments in the countries that formed after the collapse of the USSR [3]. All the mentioned works are united by focusing on traction rolling stock – locomotives and motorcar rolling stock, as well as wagons. OTMs are not paid attention to at all. Thus, in the Rules of Traction Calculations [4], which is the main guidance document for conducting them on railways of the post-Soviet countries, there are no formulas for determination of motion resistance, braking standards

#### **1. Wprowadzenie**

Specjalny samobieżny tabor kolejowy jest osobnym rodzajem taboru kolejowego, który ma odniesienie w TSI do grupy "Maszyny torowe (OTMs)". OTM są stosowane w różnych obszarach aktywności produkcyjnej dla kolei i zużywają znaczącą ilość źródeł energii. Poza tym zdarzają się wypadki kolejowe OTM, jak również innym typom taboru. Dla identyfikacji przyczyn tych wypadków przeprowadzono studium eksperckie. W obu przypadkach niezbędne jest wykonanie obliczeń trakcyjnych. W pierwszym przypadku ich celem jest zidentyfikowanie zasadnych sposobów działania, a w drugim wykrycie mechanizmu wypadków kolejowych i możliwości zapobieganiu im.

#### **2. Zestawienie problemów**

Teoria obliczeń trakcyjnych przeszła długą drogę rozwoju w krajach byłego ZSRR, z pierwszymi pracami w 19 wieku [2], do nowoczesnego rozwoju w krajach jakie powstały po upadku ZSRR [3]. Wszystkie wspomniane prace są powiązane przez ukierunkowanie na trakcyjny tabor kolejowy - lokomotywy i kolejowe wagony motorowe, jak również wagony. Pojazdom OTM nie poświęcono żadnej uwagi. W związku z tym w Zasadach Obliczeń Trakcyjnych [4], które są głównym przewodnikiem dla ich przeprowadzenia na kolejach krajów post-sowieckich, gdzie nie ma żadnych wzorów dla określenia oporów ruchu, norm dla hamowania oraz wskaźników technicznych i ekonomicznych. W związku z tym faktem nie jest możliwe osza-

and technical and economic indicators. In view of this fact, it is impossible to estimate the stopping distance of OTMs and carry out technical and economic calculations.

This problem has become particularly relevant with putting into operation of new kinds of OTMs, especially of foreign production. Different types of transmissions, internal combustion engines and different wheel configuration do not allow implementation of the formulas for similar rolling stock.

In scientific literature devoted to this issue, major attention is paid to operational modes of work, i.e. work on purpose. However, in this case as well, the analysis of efficiency and its increase are not paid sufficient attention to.

The authors' experience of forensic railway science of cases of collisions of OTMs with cars at crossings and other rolling stock, accidents of hitting people showed the severity of the problem of lack of calculation formulas. The authors had to conduct costly field research, adapting the techniques that had been developed for traction rolling stock. The examinations took a long time, and in some cases became impossible.

Thus, this article is a step in solving the problem of improving the traction and energy calculations of OTMs on the basis of approaches adopted in the countries of the former USSR.

The object of the study is OTMs, which in the countries of the former USSR is called 'special self-propelled rolling stock'.

The subject of the study is the traction parameters of OTMs.

The purpose of the study is to develop methods for establishing the main traction parameters of OTMs - motion resistance and deceleration from a single specific decelerating force.

### **3. METHODS OF TRACTION CALCULATIONS ADOPTED ON THE RAILWAYS OF THE FORMER USSR COUNTRIES**

The theory of train traction allows solving a wide range of practical and theoretical problems of improving the railway operation efficiency and increasing safety; it also allows determining the basic requirements for new types of rolling stock, etc. In traction and braking calculations, the forces acting on the rolling stock are determined, their influence on the nature of motion is assessed, etc. The theory of train traction allows establishing the speed of movement at any moment of time taking into account the requirements of traffic safety. Moreover, it allows defining expenditure of electric energy and diesel fuel and carrying out braking calculations [5].

The methods of traction calculations, adopted on the railways of the former USSR, are based on solving the train motion equation. The equation of train motion is a mathematical expression that relates the kinematic parameters of train movement (velocity, travel time) to

owanie drogi hamowania OTM i przeprowadzenie obliczeń technicznych i ekonomicznych.

Problem ten stał się szczególnie znaczący przy wprowadzaniu do eksploatacji nowych typów OTM, zwłaszcza z produkcji zagranicznej. Różne rodzaje transmisji, silniki z zapłonem wewnętrznym i różne konfiguracje kół nie pozwalają na zastosowanie wzorów dla podobnego taboru.

W literaturze naukowej poświęconej tym zagadnieniom, większa uwaga jest poświęcona operacyjnym obszarom pracy, tj. pracom użytkowym. Jednakże, także w tych przypadkach, analizom sprawności i jej wzrostowi nie jest przykładana wystarczająca uwaga.

Doświadczenia autorów w zakresie nauki o wypadkach dotyczących przypadków kolizji OTM z samochodami na przejazdach i innym taborem, wypadkach przytrafiających się ludziom, pokazały wagę problemu braku wzorów do obliczeń. Autorzy musieli przeprowadzić kosztowne poszukiwania, dostosowując rozwiniętą technikę taboru trakcyjnego. Badania zajęły dużo czasu, a w niektórych przypadkach stały się niemożliwe.

Niniejszy artykuł jest zatem krokiem dla rozwiązania problemu ulepszenia obliczeń trakcyjnych i energii dla OTM na bazie podejścia przyjętego w krajach byłego ZSRR.

Przedmiotem studium są OTM, które w krajach byłego ZSRR nazywane były "specjalnym taborem samobieżnym". Obiektem studium są parametry trakcyjne OTM. Celem studium jest rozwój metod dla ustalania głównych parametrów trakcyjnych OTM - oporów ruchu i opóźnienia z pojedynczych sił opóźniających.

### **3. Metody obliczeń trakcyjnych zastosowane na kolejach krajów byłego ZSRR**

Teoria dotycząca pociągów trakcyjnych pozwala rozwiązać szeroki zakres praktycznych i teoretycznych problemów poprawienia efektywności działania kolei i wzrostu bezpieczeństwa; co pozwala także określić podstawowe wymagania dla nowych typów taboru, itd. W obliczeniach trakcyjnych i hamowania, siły działające na tabor są określone, ich wpływ na charakter ruchu jest oceniony, itd. Teoria trakcji pociągów pozwala ustlić prędkość ruchu w każdym momencie czasu biorąc pod uwagę wymagania bezpieczeństwa ruchu. Ponadto pozwala określić wydatek energii elektrycznej i oleju napędowego oraz wykonać obliczenia hamowania [5].

Metody obliczeń trakcyjnych, przyjmowane na kolejach byłego ZSRR oparte są na rozwiązaniu równań ruchu pociągów. Równanie ruchu pociągu jest matematycznym wyrażeniem, które odnosi się do parametrów kinematycznych ruchu pociągu (prędkość, czas podróży) do wielkości sił działających na pociąg. Punkt punktu materialnego, który jest przyjęty jako pociąg w jego modelu, jest podmiotem drugiego prawa Newtona w jego najprostszej formie:  $R = ma$ , gdzie  $R$  - siła netto działająca na punkt materialny [N];  $m$  - masa

the magnitudes of forces acting on the train [3].

The motion of the material point, which is taken as a train in its model, is subject to Newton's second law in its simplest form:  $R = ma$ , where  $R$  – net force acting on the material point, N;  $m$  – mass of the material point, kg,  $a$  – its acceleration in a rectilinear translational motion,  $m/s^2$ .

Accordingly, for a train as well, the acceleration (or deceleration) of its motion is directly proportional to the magnitude of the net force, corresponds to its sign ("+" or "-") in relation to the direction of movement and inversely proportional to its mass:  $a = R / m$ .

On the other hand, as is well known, acceleration is a derivative of velocity with respect to time:

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (1)$$

So we can write that

$$\frac{dv}{dt} = \frac{R}{m} \quad (2)$$

Expression (2) shows the relationship between the kinematic parameters (velocity  $v$  and time  $t$ ) and the horizontal net force  $R$ .

Mass of the train  $m$ , kg:

$$m = \frac{1000(P+Q)}{g}, \quad (3)$$

where  $P$  - weight of the locomotive, kN;  $Q$  - weight of the set of wagons, kN.

Value  $R$  depends on the mode of train movement and the operation mode of the traction unit. Thus, for the mode of idle speed (coastdown)  $R = -W_{tan}$ , where  $W_{tan}$  - tangential impedance of the train movement, N.

For the translational motion of a train in coastdown mode, the expression of Newton's second law can be written as follows:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{W_{tan}}{m} \quad (4)$$

Equation (3) is valid specifically for the translational motion. However, in the translational motion of railway rolling stock, its individual nodes (wheelsets, rotors of the traction motors, gearwheels, cardan shafts, couplings, etc.), moving translationally, rotate simultaneously. Their rotation takes a part of the useful work of the power plant. This is taken into account when deriving the equation of train motion.

Kinetic energy of a body  $A_{kin}$ , which performs a complex (translational and rotational) motion, is a sum of energies in both kinds of this motion:

$$A_{kin} = \frac{mv^2}{2} + \sum \frac{I\omega^2}{2}, \quad (5)$$

where  $\frac{mv^2}{2}$  - kinetic energy of the translational motion of the body ( $m$  – its mass,  $v$  - velocity of translational motion), and  $\sum \frac{I\omega^2}{2}$  represents the

kinetic energy of the rotational motion of the material point [kg];  $a$  - jego przyspieszenie w prostoliniowym równoległym ruchu [ $m/s^2$ ].

Zgodnie z tym, także dla pociągów, przyspieszenie (lub opóźnienie) jego ruchu jest wprost proporcjonalne do wartości siły netto, odpowiada jego znakowi ("+" lub "-") w odniesieniu do kierunku ruchu i odwrotnie proporcjonalne do jego masy:  $a = R / m$ .

Z drugiej strony, jak ogólnie wiadomo, przyspieszenie jest pochodną prędkości w odniesieniu do czasu:

$$a = \frac{dv}{dt}, \quad (1)$$

można zatem napisać, że

$$\frac{dv}{dt} = \frac{R}{m} \quad (2)$$

Wyrażenie (2) pokazuje relację między parametrami kinematycznymi (prędkość  $v$  i czas  $t$ ) oraz poziomą siłą netto  $R$ .

Masa pociągu  $m$  [kg]:

$$m = \frac{1000(P+Q)}{g}, \quad (3)$$

gdzie  $P$  - ciężar lokomotywy [kN];  $Q$  - ciężar składu wagonów [kN].

Wartość  $R$  zależy od rodzaju ruchu pociągu i sposobu prowadzenia jednostki trakcyjnej. Dla trybu biegu jałowego (wybiegu)  $R = -W_{tan}$ , gdzie  $W_{tan}$  - styczne pozornie opory ruchu pociągu [N].

Dla przejściowego ruchu pociągu w trybie wybiegu, wyrażenie drugiego prawa Newtona można napisać następująco:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{W_{tan}}{m} \quad (4)$$

Równanie (3) jest ważne zwłaszcza dla ruchu przejściowego, jednakże w ruchu przejściowym taboru kolejowego, jego indywidualne węzły (zestawy kołowe, wirniki silników trakcyjnych, przekładnie, wały Kardana, sprzęgi itp.) poruszające się postępowo równocześnie są obracane. Ich obrót zabiera część pracy użytecznej z urządzenia mocy. Jest to wzięte pod uwagę, gdy wyprowadzane jest równanie ruchu pociągu.

Energia kinetyczna ciała  $A_{kin}$ , która tworzy kompletny ruch (postępowy i obrotowy) jest sumą energii w obu rodzajach ruchu:

$$A_{kin} = \frac{mv^2}{2} + \sum \frac{I\omega^2}{2}, \quad (5)$$

gdzie:  $\frac{mv^2}{2}$  - energia kinetyczna ciała w ruchu postępowym ( $m$  – jego masa,  $v$  - prędkość ruchu postępowego) oraz  $\sum \frac{I\omega^2}{2}$  przedstawia całkowitą energię kinetyczną wszystkich części

total kinetic energy of all rotating parts ( $I$  - their moments of inertia,  $\omega$  - angular rotational velocities). Applying expression (5) to the train, we can express the angular velocities of the rotating parts  $\omega$  through velocity of the translational motion of the train  $v$ , correlating them simultaneously (through gear ratios) with the radius of the drive wheel:  $\omega = \frac{v}{r}$ . Then we

obtain:

$$A_{\text{kin}} = \frac{mv^2}{2} + \frac{v^2}{2} \sum \frac{I}{r^2} \quad (6)$$

Values of type  $\frac{I}{r^2}$  have the dimension of mass, therefore we designate their sum as  $m_{\text{eq}}$  - equivalent mass of the rotating parts of the rolling stock and extract the value of kinetic energy of translational motion from brackets. Then

$$A_{\text{kin}} = \frac{mv^2}{2} \left[ 1 + \frac{m_{\text{eq}}}{m} \right] \quad (7)$$

Ratio

$$\frac{m_{\text{eq}}}{m} = \gamma \quad (8)$$

is called the coefficient of inertia of rotational masses. Accordingly, product  $m(1+\gamma)$  can be called the equivalent mass of the train. In terms of energy consumption in translational motion, a body with such mass is equivalent to a real train of mass  $m$ , which moves translationally and has rotating masses. This allows us to express the equation of translational motion of a train with real mass  $m$  as

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{W_{\text{tan}}}{m(1+\gamma)} = -\frac{W_{\text{tan}}}{P+Q} \cdot \frac{g}{1000(1+\gamma)} \quad (9)$$

We designate

$$\zeta = \frac{g}{1000(1+\gamma)} \quad (10)$$

Value  $\zeta$  represents specific acceleration, i.e. acceleration from the action of unit of force per unit of weight of the train.

We designate

$$w_{\text{tan}} = \frac{W_{\text{tan}}}{P+Q} \quad (11)$$

Value  $w_{\text{tan}}$  represents specific tangential motion resistance of rolling stock and is expressed in N/kN.

As a result of substitutions we obtain the following form of differential equation of train motion in the idling mode

$$\frac{dv}{dt} = \zeta (-w_{\text{tan}}) \quad (12)$$

For traction mode, the differential equation of train motion will have the form:

$$\frac{dv}{dt} = \zeta (f_{\text{tan}} - w_{\text{tan}}) \quad (13)$$

and for braking mode

wirujących ( $I$  - ich momenty bezwładności,  $\omega$  - kątowne prędkości obrotowe).

Stosując wyrażenie (5) do pociągu, można wyrazić prędkości kątowne części wirujących  $\omega$  poprzez prędkość ruchu postępowego pociągu  $v$ , korelując je równocześnie (poprzez stopnie przelozenia) z promieniem koła napędnego:  $\omega = \frac{v}{r}$ . Otrzymuje się

wtedy:

$$A_{\text{kin}} = \frac{mv^2}{2} + \frac{v^2}{2} \sum \frac{I}{r^2} \quad (6)$$

Wartość typu  $\frac{I}{r^2}$  ma wymiar masy, można zatem wyznaczyć ich sumę jako  $m_{\text{eq}}$  - masa ekwiwalentna części wirujących taboru i wyciągnąć wartość energii kinetycznej ruchu postępowego z nawiasów.

Wtedy:

$$A_{\text{kin}} = \frac{mv^2}{2} \left[ 1 + \frac{m_{\text{eq}}}{m} \right]$$

Stosunek

$$\frac{m_{\text{eq}}}{m} = \gamma \quad (8)$$

Zgodnie z tym iloczyn  $m(1+\gamma)$  może być nazwany masą ekwiwalentną pociągu. W warunkach zużycia energii w ruchu postępowym, ciało z taką masą jest ekwiwalentne z rzeczywistą masą pociągu  $m$ , która porusza się postępowo i ma masy wirujące. To pozwala wyrazić równanie ruchu postępowego pociągu z masą rzeczywistą  $m$  jako:

$$\frac{dv}{dt} = -\frac{W_{\text{tan}}}{m(1+\gamma)} = -\frac{W_{\text{tan}}}{P+Q} \cdot \frac{g}{1000(1+\gamma)} \quad (9)$$

Można wyznaczyć:

$$\zeta = \frac{g}{1000(1+\gamma)} \quad (10)$$

Wartość  $\zeta$  przedstawia przyspieszenie, tj. przyspieszenie z działania siły jednostkowej przez jednostkę ciężaru pociągu.

Można wyznaczyć:

$$w_{\text{tan}} = \frac{W_{\text{tan}}}{P+Q} \quad (11)$$

Wartość  $w_{\text{tan}}$  przedstawia styczną rezystancję ruchu taboru i jest wyrażona w N/kN.

Jako wynik podstawień otrzymuje się następującą postać równania różniczkowego ruchu pociągu w trybie wybiegu:

$$\frac{dv}{dt} = \zeta (-w_{\text{tan}}) \quad (12)$$

Dla trybu napędu równanie różniczkowe ruchu pociągu będzie miało postać:

$$\frac{dv}{dt} = \zeta (f_{\text{tan}} - w_{\text{tan}}) \quad (13)$$

a dla trybu hamaowania:

$$\frac{dv}{dt} = \zeta (-w_{\tan} - b_{br}), \quad (14)$$

where  $f_{\tan}$  - specific tangential traction force, N/kN;  
 $w_{\tan}$  - total specific tangential motion resistance,  
 N/kN;  $b_{br}$  - specific braking force, N/kN.

Since specific forces of motion resistance are dimensionless quantities from the point of view of physics, the value of constant  $\zeta$  has the dimension of acceleration. It is this constant that represents the quantity of specific acceleration – acceleration with which a body moves due to the action of a single specific force 1 N/kN, i.e. under the action of force of 1 N per unit of body weight equal to 1 kN.

Equations (12-14) have a general character, it does not depend on the characteristics of rolling stock and equally determines the motion nature of rolling stock of any type. Numerical value of constant  $\zeta$  in the differential equation of train motion must be clarified due to the speed measurement in km/h, generally accepted in the theory of train traction.

Given that

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2 = 127000 \text{ km/h}^2$$

it follows that

$$\zeta = \frac{127}{(1+\gamma)}. \quad (15)$$

The magnitude of the coefficient of inertia of rotational masses  $(1+\gamma)$  has different values for different types of rolling stock. Values  $(1+\gamma)$  and  $\zeta$  for some types of rolling stock according to [4] are given in table 1.

Wielkość współczynnika bezwładności mas wirujących  $(1 + \gamma)$  ma różne wartości dla różnych rodzajów taboru kolejowego. Wartości  $(1 + \gamma)$  i  $\zeta$  dla niektórych rodzajów taboru, zgodnie z [4] są podane w tablicy 1.

Type of rolling stock	$(1+\gamma)$	$\zeta, \frac{\text{km/h}^2}{\text{N/kN}}$
Electric trains of all series	1,15...1,3	97...110
Electric multiple units	1,06...1,07	118...120
Diesel locomotives	1,07...1,13	112...118
Diesel multiple units	1,09...1,1	115...116
Passenger cars	1,04...1,05	121...122
Loaded freight wagons	1,03...1,04	122...123
Empty freight wagons	1,07...1,08	117...119
Rodzaj taboru kolejowego	$(1+\gamma)$	$\zeta, \frac{\text{km/h}^2}{\text{N/kN}}$
Pociągi elektryczne wszystkich serii	1,15...1,3	97...110
Elektryczne zespoły trakcyjne	1,06...1,07	118...120
Lokomotywy spalinowe	1,07...1,13	112...118
Spalinowe zespoły trakcyjne	1,09...1,1	115...116
Wagony osobowe	1,04...1,05	121...122
Ładowne wagony towarowe	1,03...1,04	122...123
Puste wagony towarowe	1,07...1,08	117...119

$$\frac{dv}{dt} = \zeta (-w_{\tan} - b_{br}), \quad (14)$$

gdzie:  $f_{\tan}$  - styczna siła trakcyjna [N/kN];  $w_{\tan}$  - całkowite styczne opory ruchu;  $b_{br}$  - siła hamowania [N/kN].

Jako że siły oporów ruchu są wielkościami bezwymiarowymi z punktu widzenia fizyki, wartość  $\zeta$  ma wymiar przyspieszenia. Jest to ta stała, jaka reprezentuje wielkość przyspieszenia - przyspieszenia z jakim ciało porusza się z powodu działania specjalnej pojedynczej siły 1 N/kN, tj. w wyniku działania siły 1 N na jednostkę ciężaru ciała równej 1 kN.

Równania (12-14) mają charakter ogólny, jako że nie zależą od charakterystyk taboru i w równym stopniu określają charakter ruchu taboru każdego rodzaju. Wartość liczbowa stałej  $\zeta$  w równaniu różniczkowym ruchu pociągu musi być wyjaśniona z powodu pomiaru prędkości w km/h, ogólnie akceptowanej w teorii trakcji pociągu.

Jeśli uwzględnimy, że

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2 = 127000 \text{ km/h}^2,$$

z tego wynika, że

$$\zeta = \frac{127}{(1+\gamma)}. \quad (15)$$

As can be seen from table 1, values  $(1 + \gamma)$  and  $\zeta$  are influenced by the ratio of the mass of the rolling stock to the mass of the rotating parts. So in empty freight wagons the value of coefficient  $(1 + \gamma)$  is greater than in the loaded ones, and value  $\zeta$  is, respectively, smaller due to the greater influence of the same rotating parts (wheel pairs) on the wagon of lower mass [3].

For special self-propelled rolling stock, value  $(1 + \gamma)$  and value  $\zeta$ , respectively, are not given in the regulatory, reference and general technical literature.

The total tangential resistance of motion has a number of components (basic specific resistance, specific resistance in idling mode, specific gradient resistance, curve resistance, etc.) acting continuously or in specific conditions [3,4]. For example, in the case of traction unit (locomotive, railcar train, special self-propelled rolling stock) moving in the idle speed (coastdown) mode along a straight flat section of track in windless weather at a positive ambient temperature, the total tangential specific motion resistance will be equal to the specific motion resistance in the idling mode:

$$w_{\text{tan}}(v) = w_{\text{id}}(v). \quad (16)$$

For locomotives, wagons and railcar rolling stock, the formulas for determining specific motion resistance in the idling mode are given in [4]. They have the form

$$w_{\text{id}} = A + B \cdot v + C \cdot v^2, \quad (17)$$

where  $A, B, C$  – coefficients depending on the type of rolling stock.

In braking calculations, the most common method of solving differential equation (14) is a numerical method in which the braking distance  $s_{\text{br}}$  is determined as follows:

$$s_{\text{br}} = s_{\text{pr}} + s_{\text{act}}, \quad (18)$$

$$s_{\text{pr}} = 0,278 \cdot v_s \cdot t_{\text{pr}}, \quad (19)$$

$$t_{\text{pr}} = D - \frac{E \cdot w_{\text{gr}}}{b_{\text{br}}}, \quad (20)$$

$$s_{\text{act}} = \sum_{i=1}^n \frac{500(v_{e_i}^2 - v_{s_i}^2)}{\zeta(1000b_{\text{br}_i} + w_{\text{tan}_i})}, \quad (21)$$

where  $s_{\text{pr}}$  - distance of preparation of the brakes for action, m;  $s_{\text{act}}$  - actual braking distance, m;  $v_s$  - velocity at the start of braking, km/h;  $t_{\text{pr}}$  - time of preparation of the brakes for action, s;  $D, E$  – coefficients depending on the length of the train, the type of rolling stock and the kind of braking;  $w_{\text{gr}}$  - specific resistance to track gradient, N/kN;  $v_e$  - velocity at the end of braking, km/h.

Jak widać z tablicy 1 wartości  $(1 + \gamma)$  i  $\zeta$  są zależą od stosunku masy taboru do masy części wirujących. Dla pustych wagonów towarowych wartość współczynnika  $(1 + \gamma)$  jest zatem większa niż w załadowanych, a wartość  $\zeta$  jest z kolei mniejsza z powodu większego wpływu tych części wirujących (par kół) na wagon o niższej masie [3].

Dla specjalnego taboru samobieżnego wartość  $(1 + \gamma)$  i odpowiednio wartość  $\zeta$  nie są podane w regulacjach, referencjach i ogólnej literaturze twchnicznej.

Całkowite styczne opory ruchu mają szereg komponentów (opór podstawowy, opór w trybie wybiegu, opór pochylenia, opór w łuku, itp.) działających stale lub w warunkach szczególnych [3, 4]. Przykładowo w przypadku jednostki trakcyjnej (lokomotywy, pociągu osobowego, specjalnego taboru samobieżnego) poruszającej się w trybie wybiegu (jazdy beznapędowej) wzdłuż prostej i płaskiej sekcji trasy w bezwietrznej pogodzie w dodatniej temperaturze otoczenia, całkowite styczne opory ruchu będą równe oporom ruchu w trybie wybiegu:

$$w_{\text{tan}}(v) = w_{\text{id}}(v). \quad (16)$$

Dla lokomotyw, wagonów towarowych i pasażerskich, wzory dla określenia oporów ruchu w trybie wybiegu są podane w [4]. Mają one postać:

$$w_{\text{id}} = A + B \cdot v + C \cdot v^2, \quad (17)$$

gdzie:  $A, B, C$  - współczynniki zależne od rodzaju taboru.

W obliczeniach hamowania najbardziej powszechną metodą rozwiązywania równania różniczkowego (14) jest numeryczna metoda, w której droga hamowania  $s_{\text{br}}$  jest określona następująco:

$$s_{\text{br}} = s_{\text{pr}} + s_{\text{act}}, \quad (18)$$

$$s_{\text{pr}} = 0,278 \cdot v_s \cdot t_{\text{pr}}, \quad (19)$$

$$t_{\text{pr}} = D - \frac{E \cdot w_{\text{gr}}}{b_{\text{br}}}, \quad (20)$$

$$s_{\text{act}} = \sum_{i=1}^n \frac{500(v_{e_i}^2 - v_{s_i}^2)}{\zeta(1000b_{\text{br}_i} + w_{\text{tan}_i})}, \quad (21)$$

gdzie:  $s_{\text{pr}}$  - droga przygotowania hamulców do działania [m],  $s_{\text{act}}$  - rzeczywista droga hamowania [m],  $v_s$  - prędkość na początku hamowania [km/h],  $t_{\text{pr}}$  - czas przygotowania hamulców do działania [s],  $D, E$  - współczynniki zależne od długości pociągu, rodzaju taboru i rodzaju hamowania,  $w_{\text{gr}}$  - opory nachylenia toru [N/kN],  $v_e$  - prędkość na końcu hamowania [km/h].

Jak zaznaczono wyżej nie ma współczynnika  $A, B, C, D, E$  i wartości  $\zeta$  dla OTM, zatem autorzy proponują metody dla ich określenia doświadczalnego.

As noted above, for OTMs there are no coefficients  $A, B, C, D, E$  and value  $\zeta$ . We propose methods for their experimental determination.

#### 4. METHOD OF DETERMINATION OF VALUE $\zeta$

One of the methods of determining  $\zeta$  is based on the use of experimental dependence of acceleration and deceleration of a rolling stock unit on the speed of movement in the coastdown mode [6]. To do this, the unit of rolling stock is rolled down in the coastdown mode along a pre-measured gradient (acceleration mode). Then rolling up is carried out, accelerating the unit of rolling stock and proceeding to the start of the count in the coastdown mode (deceleration mode). In the process, the time and speed of the rolling stock unit are recorded. As a result of data processing dependence  $\frac{\Delta v}{\Delta t}(v)$  is found, which is averaged over short periods of time during which the speed of the rolling stock unit is taken as constant.

Assuming the motion resistance during the descent and ascent with the same speed to be equal, we obtain an equation of motion of a rolling stock unit when it is moving downhill (acceleration):

$$(w_{gr} - w_b)g = 10^3(1 + \gamma)(\Delta v / \Delta t)_{acc}, \quad (22)$$

and when it is moving uphill (deceleration):

$$(w_{gr} + w_b)g = -10^3(1 + \gamma)(\Delta v / \Delta t)_{dec}, \quad (23)$$

where  $\Delta v / \Delta t$  – average value of acceleration (deceleration) of rolling stock over time  $\Delta t$ ,  $m/s^2$ .

Composing equations (6) and (7) we find that:

$$1 + \gamma = 2w_{gr}g / (10^3((\Delta v / \Delta t)_{acc} - (\Delta v / \Delta t)_{dec})). \quad (24)$$

Taking into account (15) value  $\zeta$  will be defined as

$$\zeta = \frac{127 \cdot (10^3((\Delta v / \Delta t)_{acc} - (\Delta v / \Delta t)_{dec}))}{2w_{gr}g}. \quad (25)$$

For greater accuracy, the study is recommended to be conducted on significant gradients.

#### 5. METHOD OF THE SPECIFIC ROLLING RESISTANCE DETERMINATION

Let us take a partial case of movement of a traction unit of special self-propelled rolling stock (for example, a speeder) along a straight flat section of track in the absence of influence of crosswinds and low ambient temperature. In this case, equation (14) can be written as follows

$$\frac{dv}{dt} = -\zeta \cdot w_{id}(v). \quad (26)$$

We will rewrite equation (26) as:

$$dt = -\frac{1}{\zeta} \frac{dv}{w_{id}(v)}. \quad (27)$$

#### 4. Metody określenia wartości $\zeta$

Jedną z metod określenia  $\zeta$  jest oparta na zastosowaniu doświadczalnej zależności przyspieszenia i opóźnienia jednostki taboru na prędkość ruchu w trybie jazdy bezprądowej [6]. Dla jej wykonania jednostka taboru jest staczana na wcześniej pomierzonym pochyleniu (tryb przyspieszania). Następnie realizowane jest wtaczanie przyspieszające jednostkę taboru w trybie wybiegu i procedura początku liczenia w trybie wybiegu (tryb opóźnienia). W tym procesie rejestrowane są czas i prędkość jednostki taboru.

Jako wynik przetwarzania danych znaleziona zostaje

zależność  $\frac{\Delta v}{\Delta t}(v)$ , która jest uśredniana w krótkich

okresach czasu, podczas których prędkość jednostki taboru jest brana jako stała.

Zakładając, że opory ruchu podczas zjazdu i podjazdu z tą samą prędkością mają być równe, otrzymuje się równanie ruchu jednostki taboru, gdy porusza się w dół (przyspieszanie):

$$(w_{gr} - w_b)g = 10^3(1 + \gamma)(\Delta v / \Delta t)_{acc}, \quad (22)$$

a gdy porusza się w górę (opóźnienie):

$$(w_{gr} + w_b)g = -10^3(1 + \gamma)(\Delta v / \Delta t)_{dec}, \quad (23)$$

gdzie:  $\Delta v / \Delta t$  – średnia wartość przyspieszenia (opóźnienia) taboru w czasie  $\Delta t$  [ $m/s^2$ ].

Składając równania (6) i (7) znajduje się:

$$1 + \gamma = 2w_{gr}g / (10^3((\Delta v / \Delta t)_{acc} - (\Delta v / \Delta t)_{dec})). \quad (24)$$

Biorąc pod uwagę (15) wartość  $\zeta$  będzie zdefiniowana jako:

$$\zeta = \frac{127 \cdot (10^3((\Delta v / \Delta t)_{acc} - (\Delta v / \Delta t)_{dec}))}{2w_{gr}g}. \quad (25)$$

Dla większej dokładności zaleca się przeprowadzenie studium na znaczących pochyleniach.

#### 5. Metoda określenia oporów toczenia

Biorąc przypadek ruchu jednostki trakcyjnej specjalnego samobieżnego taboru (na przykład pojazd inspekcyjny) wzdłuż poziomego, płaskiego odcinka toru przy braku wpływu wiatru bocznego i niskiej temperatury otoczenia, równanie (14) może być napisane następująco:

$$\frac{dv}{dt} = -\zeta \cdot w_{id}(v). \quad (26)$$

Można przekształcić równanie (26) jako:

$$dt = -\frac{1}{\zeta} \frac{dv}{w_{id}(v)}. \quad (27)$$

Dla otrzymania zależności  $v$  (s) obie części równania (27) będą wymnożone przez  $v$ . Uwzględniając  $v dt = ds$  można napisać:

$$ds = -\frac{1}{\zeta} \frac{v dv}{w_{id}(v)}. \quad (28)$$

To obtain the dependence  $v(s)$ , we will multiply both parts of equation (27) by  $v$ . Considering  $vdt = ds$ , we can write

$$ds = -\frac{1}{\zeta} \frac{v dv}{w_{id}(v)}. \quad (28)$$

By integrating this expression into distance within  $s_i$  and  $s_{i+1}$  and within velocities  $v_i$  and  $v_{i+1}$  corresponding to these way points, we obtain the dependence

$$\int_{s_i}^{s_{i+1}} ds = -\frac{1}{\zeta} \int_{v_i}^{v_{i+1}} \frac{v dv}{w_{id}(v)}, \quad (29)$$

or

$$s_{i+1} - s_i = -\frac{1}{\zeta} \int_{v_i}^{v_{i+1}} \frac{v dv}{w_{id}(v)}. \quad (30)$$

From equation (30) with a constant value  $w_{xn}$  in interval  $n$  we obtain

$$\Delta s_i = \frac{1}{\zeta \cdot w_{id i}} \int_{v_i}^{v_{i+1}} v dv = \frac{v_{i+1}^2 - v_i^2}{2 \cdot \zeta \cdot w_{id i}}, \quad (31)$$

if  $s$  - in km, or

$$\Delta s_n = \frac{500(v_{n+1}^2 - v_n^2)}{\zeta \cdot w_{xn}}, \quad (32)$$

if  $s$  - in m.

From equation (32)

$$w_{xn} = -\frac{500 \cdot (v_{n+1}^2 - v_n^2)}{\zeta \cdot \Delta s_n}, \quad (33)$$

where  $s$  - in m.

## 6. EXPERIMENTAL DETERMINATION OF $\zeta$

At the initial stage of the research, the profiles of sections were analyzed and a straight section with gradient

-9,45 ‰ was selected. Accordingly, the resistance to gradient will be  $w_{gr} = 9,45$  N/kN.

At the next stage, according to the method described above, 5 runs of the DGK speeder were carried out.

The runs took place in the following way. In the acceleration mode, the speeder was set in a certain place at the beginning of the gradient. On command, the brakes were released and at the beginning of the movement the electronic stopwatch with the function of sequential recording of time intervals was turned on. Time was recorded when the speeder reached the speeds of 5, 10, 15 and 20 km/h. The speed of movement was determined by the standard device ALS-MP, which includes a speed sensor and a speed display unit. The error of speed control in the range from 1 to 10 km/h is  $\pm 1$  km/h [7, 8].

In the deceleration mode, the speeder was accelerated on the previous elements of profile to the speed of 25... 30 km/h and at the point of approaching the beginning of the experimental section, the traction was turned off in such a way that at the beginning of the section the speed was 20 km/h. At the moment of

Przez scałkowanie tego wyrażenia wg drogi w zakresie  $s_i$  i  $s_{i+1}$  oraz według prędkości  $v_i$  i  $v_{i+1}$  odpowiadającym tym punktom drogi, otrzymuje się zależność:

$$\int_{s_i}^{s_{i+1}} ds = -\frac{1}{\zeta} \int_{v_i}^{v_{i+1}} \frac{v dv}{w_{id}(v)}, \quad (29)$$

lub

$$s_{i+1} - s_i = -\frac{1}{\zeta} \int_{v_i}^{v_{i+1}} \frac{v dv}{w_{id}(v)}. \quad (30)$$

Z równania (30) z wartością stałą  $w_{xn}$  w przedziale  $n$  otrzymuje się:

$$\Delta s_i = \frac{1}{\zeta \cdot w_{id i}} \int_{v_i}^{v_{i+1}} v dv = \frac{v_{i+1}^2 - v_i^2}{2 \cdot \zeta \cdot w_{id i}}, \quad (31)$$

jeśli  $s$  - w [km], lub

$$\Delta s_n = \frac{500(v_{n+1}^2 - v_n^2)}{\zeta \cdot w_{xn}}, \quad (32)$$

jeśli  $s$  - w [m].

Z równania (32)

$$w_{xn} = -\frac{500 \cdot (v_{n+1}^2 - v_n^2)}{\zeta \cdot \Delta s_n}, \quad (33)$$

gdzie  $s$  - w [m].

## 6. Doświadczalne określenie $\zeta$

W początkowym etapie badań analizowane były profile sekcji i wybrane zostały proste odcinki z pochyleniem -9,45 ‰. Opory dla pochylenia zgodnie z tym będą  $w_{gr} = 9,45$  N/kN.

W następnym etapie, zgodnie z metodą opisaną wyżej, przeprowadzono 5 jazd wagonem inspekcyjnym DGK.

Jazdy odbywały się w następujący sposób. W trybie przyspieszania pojazd był ustawiony w pewnym miejscu na początku pochylenia. Na polecenie zwalniane były hamulce i na początku ruchu załączony był elektroniczny stoper z funkcją zapisu sekwencyjnego interwałów czasowych. Czas był zapisywany, gdy pojazd osiągał prędkość 5, 10, 15 i 20 km/h. Prędkość ruchu była determinowana przez znormalizowane urządzenie ALS-MP, które zawiera czujnik prędkości i jednostkę wyświetlacza prędkości. Błąd kontroli prędkości w zakresie od 1 do 10 km/h wynosi  $\pm 1$  km/h [7, 8].

W trybie opóźnienia pojazd był przyśpieszany na poprzednim fragmencie profilu do prędkości 25 - 30 km/h i w punkcie zbliżania się do początku sekcji doświadczalnej napęd był wyłączany i w ten sposób, że na początku sekcji prędkość wynosiła 20 km/h. W chwili osiągnięcia prędkości 20 km/h włączany był stoper elektroniczny i gdy prędkości 15, 10, 5 i 0 km/h zostały uzyskane, czas był przez niego rejestrowany. Wyniki uzyskane podczas tych jazd są zestawione w tabl. 2.

---

reaching the speed of 20 km/h, the electronic stopwatch was turned on and when the speeds of 15, 10, 5 and 0 km/h were reached, the time was recorded by it. The results received during the runs are listed in table 2.

Tablica 2 Table 2

Motion mode	V, km/h	Stopwatch readings for a run [s]					
		1	2	3	4	5	average value
acceleration	0	0	0	0	0	0	0
	5	19,83	18,92	17,07	18,95	17,5	18,45
	10	50,87	49,32	47,25	50,12	47,43	49,00
	15	73,19	72,11	67,15	71,13	66,45	70,00
	20	102,53	100,3	97,33	98,25	100,1	99,70
deceleration	0	0	0	0	0	0	0
	11,07	10,13	11,53	10,85	10,98	10,91	10,91
	18,09	20,03	19,57	18,88	19,59	19,23	19,23
	29,99	30,93	30,55	30,4	30,67	30,51	30,51
	39,05	39,53	40,29	39,32	40,12	39,66	39,66

The results of the calculations are summarized in table 3.

Tablica 3 Table 3

Value of $\Delta v / \Delta t$ for the mode of	
acceleration	deceleration
0,0573	-0,139

Wartość $\Delta v / \Delta t$ dla trybu	
przyśpieszenia	opóźnienia
0,0573	-0,139

Substituting the received values into formulas (24) and (25), we obtain:

$$1 + \gamma = \frac{2 \cdot 9,45 \cdot 9,81}{10^3 (0,0573 - (-0,139))} = 0,945,$$

$$\zeta = \frac{127}{0,945} = 134 \text{ km/h}^2.$$

## 7. EXPERIMENTAL DETERMINATION OF SPECIFIED ROLLING RESISTANCE.

Using the theoretical positions given above, the basic specific resistance of the DGK speeder motion was determined experimentally. The results, which are given in [11] for another value of  $\zeta$ , are partially used in this research.

For calculations, we will take the value defined above  $\zeta = 134 \text{ km/h}^2$ . Substituting this value in (33), we will obtain the final formula for calculating the value of basic specific resistance in the velocity range  $v_n \dots v_{n+1}$ :

$$w_{idi} = -\frac{3,731 \cdot (v_{i+1}^2 - v_i^2)}{\Delta s_i}. \quad (34)$$

To determine distance  $s_i$ , at which the velocity changes from  $v_i$  to  $v_{i+1}$ , eight runs of the DGK speeder were conducted along a straight section of the track with zero gradient.

Distance and speed were recorded using a smartphone GPS sensor and Live GPS Tracker software (in free access), which allows real-time tracking of

Bazując na wynikach otrzymanych w jazdach, tworzone były zależności  $v(t)$  stosując metodę najmniejszych kwadratów [9], dane były aproksymowane i tworzone było równanie linii trendu typu  $v = at + b$ , gdzie  $a$  będzie poszukiwaną wartością przyśpieszenia (opóźnienia) - rys. 1.

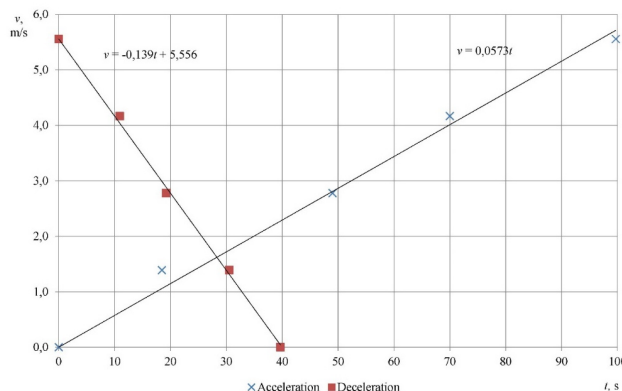


Figure 1. Dependence  $v(t)$  for the DGK speeder

Rys. 1. Zależność  $v(t)$  dla pojazdu inspekcyjnego DGK

Opis: Acceleration – przyśpieszenie; Deceleration - opóźnienie

Wyniki obliczeń są zebrane w tabl. 3.

Podstawiając otrzymane wartości do wzorów (24) and (25), otrzymuje się:

$$1 + \gamma = \frac{2 \cdot 9,45 \cdot 9,81}{10^3 (0,0573 - (-0,139))} = 0,945,$$

$$\zeta = \frac{127}{0,945} = 134 \text{ km/h}^2.$$

## 7. Doświadczalne określenie oporów toczenia

Stosując teoretyczne sytuacje podane wyżej, podstawowe opory dla pojazdu inspekcyjnego DGK zostały określone doświadczalnie. Wyniki, które podano w [11] dla innych wartości  $\zeta$  zostały częściowo użyte w tych badaniach.

Dla obliczeń zostaną wzięte wartości określone wyżej  $\zeta = 134 \text{ km/h}^2$ . Podstawiając tą wartość do (33) uzyska się końcowy wzór dla obliczeń wartości oporów podstawowych w zakresie prędkości  $v_n - v_{n+1}$ :

$$w_{idi} = -\frac{3,731 \cdot (v_{i+1}^2 - v_i^2)}{\Delta s_i}. \quad (34)$$

Dla określenia drogi  $s_i$ , na której prędkość zmienia się od  $v_i$  do  $v_{i+1}$ , wykonano osiem jazd pojazdem inspekcyjnym DGK wzdłuż prostego odcinka toru z zerowym pochyleniem.

Droga i prędkość były rejestrowane stosując oprogramowanie czujnika smartfonu GPS i lokalizatora GPS (z darmowym dostępem), które pozwala na śledzenie prędkości i przebytej drogi w czasie realnym. Na początku prób (podczas jazd próbnych) weryfikowane były odczyty czujnika GPS i standardowego elektronicznego prędkościomierza pojazdu.

W trakcie tego ustalono, że odczyty tych urządzeń są zbieżne. Interwały zmiany prędkości wynosiły

speed and distance travelled. At the beginning of the tests (during test runs), the readings of the GPS sensor and the standard electronic speedometer of the speeder were verified. In doing so it was established that the readings of these devices coincided. The speed change interval was 10 km/h, the initial speed from which the fixation of the distance began was 20 km/h, the runs were held in both directions. The speeder was accelerated to a speed slightly higher than 20 km/h, at which the distance was counted.

10 km/h, prędkość początkowa drogi, od której zaczynało ustalanie odległości wynosiła 20 km/h, jazdy odbywały się w obu kierunkach. Pojazdu inspekcyjny był rozpędzany do prędkości nieznacznie większej niż 20 km/h, przy której była liczona odległość.

Wyniki uzyskane z tych jazd są podane w tabl. 4. Jazdy pod liczbami nieparzystymi były wykonywane według liczników drogi, z liczbami parzystymi - przeciwnie do liczników drogi dla zrekompensowania niedokładności pomiaru profilu i wpływu oporu wiatru.

Tablica 4 Table 4

$v$ , km/h	Value of the distance travelled from the start of the count (or from the previous speed value) for run [km]							
	1	2	3	4	5	6	7	8
20	0,36	0,15	0,17	0,14	0,21	0,13	0,1	0,13
15	0,78	0,45	0,56	0,45	0,42	0,36	0,51	0,5
10	1,44	0,78	1,11	0,65	1,08	0,51	0,94	0,71
5	1,84	0,95	1,45	0,79	1,49	0,61	1,65	0,84
0	2,07	1,02	1,61	0,83	1,72	0,64	1,84	0,88

Tablica 5 Table 5

$v$ , km/h	Value of basic specific resistance $w_{id}$ , N/kN, for run [km]							
	1	2	3	4	5	6	7	8
15	1,036	1,777	1,191	1,191	2,195	1,287	0,425	0,750
10	0,704	1,492	0,838	0,838	2,195	0,697	0,187	0,293
5	0,592	1,555	0,746	0,746	2,073	0,583	0,049	0,073

The results received at the runs are given in table 4. Runs under odd numbers were carried out following the kilometer count, with even numbers - against the kilometer count to compensate for the inaccuracy of the profile measurement and the influence of wind resistance.

The obtained values allow calculating the basic specific resistance of the speeder motion for the average value of the speed in the interval by formula (11). Here is a detailed calculation for the speed range 20...10 km/h (average speed in the range is 15 km/h).

The distance travelled during this speed change interval

$$s = 1,44 - 0,36 = 1,08 \text{ km} = 1080 \text{ m.}$$

The basic specific motion resistance in this speed range

$$w_{id} = -\frac{3,731 \cdot (10^2 - 20^2)}{1080} = 1,036 \text{ N/kN.}$$

Further calculations are summarized in table 5.

As can be seen from the calculation results, in the 5th run the values of specific resistance for all speeds are maximal, and in the 7th - minimal, which may indicate a significant deviation of the actual speed at the beginning of the measurements from the value of 20 km/h.

Based on the data of table 2, the average value of the basic specific motion resistance is established for all runs except the 5th and 7th and dependence  $w_{id} = f(v)$  in tabular form is received (table 6).

Otrzymane wartości pozwalają na obliczenie wzorem (11) podstawowego oporu ruchu pojazdu dla średniej wartości prędkości w interwałach. Jest tutaj dokładne obliczenie dla prędkości zakresu 20-10 km/h (średnia prędkość w tym zakresie jest 15 km/h).

Przebyta droga podczas tego interwału zmiany prędkości:

$$s = 1,44 - 0,36 = 1,08 \text{ km} = 1080 \text{ m.}$$

Podstawowe opory ruchu w tym zakresie prędkości:

$$w_{id} = -\frac{3,731 \cdot (10^2 - 20^2)}{1080} = 1,036 \text{ N/kN.}$$

Dalsze obliczenia są zebrane w tabl. 5.

Jak można zobaczyć w wynikach obliczeń w 5. jeździe wartości specjalnych oporów dla wszystkich prędkości są maksymalne, a w 7. minimalne, co może wskazywać na znaczące odchylenie aktualnej prędkości na początku pomiarów od wartości 20 km/h.

Opierając się na danych tabl. 2 średnia wartość podstawowych oporów ruchu jest ustalona dla wszystkich jazd za wyjątkiem 5. i 7. i zależność  $w_{id} = f(v)$  została przyjęta w formie tabelarycznej (tabl. 6).

Tablica 6 Table 6

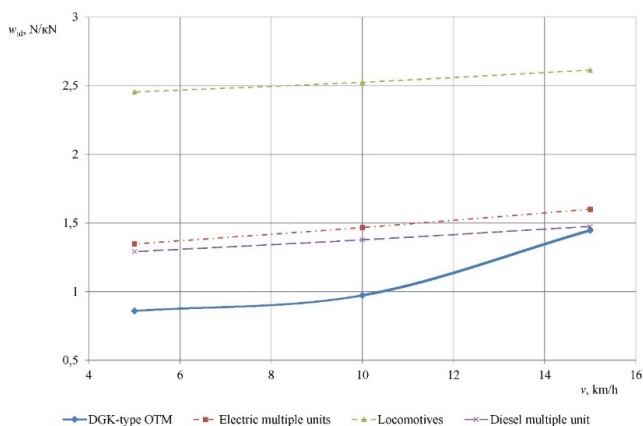
$v$ , km/h	15	10	5
$w_x$ , N/kN	1,45	0,972	0,859

Zgodnie z danymi z tablicy 6 została utworzona graficzna zależność  $w_x(v)$ , co pokazano rys. 2.

Przyjęto, że przez aproksymację danych zależność może być opisana wyrażeniem:

$$w_x = 1,105 - 0,0852v + 0,0072v^2,$$

According to the data of table 6 graphical dependence  $w_x(v)$  is built, which is shown in figure 2.



Rys. 2 Figure 2

Opis: DGK type OTM – OTM typu DGK; Electric multiply unit – e.z.t.; Diesel multiply unit – s.z.t.

By approximating the data, it is established that the dependence can be described by an expression

$$w_x = 1,105 - 0,0852v + 0,0072v^2.$$

Therefore  $A = 1,105$ ;  $B = -0,852$ ,  $C = 0,0072$ .

For comparison, figure 1 also shows the dependences  $w_x = f(v)$  for other types of rolling stock, which are built on the basis of formulas for determining the specific motion resistance in idle speed mode, which are given in [4].

Figure 2 shows that the specific motion resistance of the DGK-type OTM is close in value to the resistance of diesel multiple units and electric multiple units and much lower than the specific motion resistance of locomotives, which proves the adequacy of the received results.

## 8. CONCLUSION

As a result of researches the most important parameters of the railroad DGK-type speeder are received. These parameters are necessary for traction calculations. The first parameter is the specific acceleration, which for the DGK-type speeder is  $134 \text{ km/h}^2$ . The second parameter is the specific rolling resistance. The dependence of this parameter on the speed is determined. A comparison of the obtained results with similar parameters of other types of rolling stock shows their adequacy. The techniques were shown in the article can be used to determine these parameters for different types of OTMs.

It is obvious that in order to introduce the obtained values and formulas into normative documents, it is necessary to conduct a large number of studies with many units of OTMs. Also the development of the obtained results processing techniques is needed. And that is the way of future researches.

a zatem  $A = 1,105$ ;  $B = -0,852$ ,  $C = 0,0072$ .

Dla porównania, rysunek 1 pokazuje także zależności  $w_x = f(v)$ , które są budowane na bazie wzorów dla określenia oporów ruchu w trybie wybiegu dla innych typów taboru, a które podane są w [4].

Rysunek 2 pokazuje, że opory ruchu OTM pojazdu inspekcyjnego typu DGK są bliskie wartości oporu spalinyowych zespołów trakcyjnych i elektrycznych zespołów trakcyjnych i znacznie niższe niż opory ruchu lokomotyw, co dowodzi odpowiedności otrzymanych rezultatów.

## 8. Wniosek

Jako wynik badań uzyskano najważniejsze parametry dla szynowo-drogowego pojazdu typu DGK. Parametry te są niezbędne dla obliczeń trakcyjnych. Pierwszym parametrem to przyśpieszenie, które dla badanego pojazdu typu DGK wynosi  $134 \text{ km/h}^2$ . Drugim parametrem jest opór toczenia. Została określona zależność tego parametru od prędkości. Porównanie otrzymanych wyników z podobnymi parametrami innego typu taboru pokazuje ich odpowiedność. Techniki, jakie zostały pokazane w artykule mogą być stosowane dla określenia tych parametrów dla różnych typów OTM.

Oczywiste jest, że w celu wprowadzenia otrzymanych wartości i wzorów do dokumentów normalizacyjnych, niezbędne jest przeprowadzenie dużej liczby studiów z wieloma jednostkami OTM. Potrzebny jest także rozwój technik przetwarzania uzyskanych wyników. Jest to droga dla przyszłych badań.

## Bibliography Bibliografia

- [1] Commission Regulation (EU) No 1302/2014 of 18 November 2014 concerning a technical specification for interoperability relating to the 'rolling stock — locomotives and passenger rolling stock' subsystem of the rail system in the European Union. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L\\_.2014.356.01.0228.01.ENG](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=uriserv%3AOJ.L_.2014.356.01.0228.01.ENG).
- [2] Lomonosov Yu. (1915), Traction calculations, Joint Stock South Russian Printing Society Publ., Odessa (in Russian).
- [3] Kuzmich V.D., Rudnev V.S., Frenkel S.Ia., (2005), The theory of locomotive traction, Marshrut Publ. Moscow (in Russian).
- [4] Rules of the traction calculations for the train operations (1985), Transport Publ., Moscow (in Russian).
- [5] Sokol E. (2004) Derailments and collisions of rolling stock (Forensic science. Elements of theory and practice), Transport of Ukraine Publ., Kyiv (in Russian).
- [6] Rozenfeld V. E. (1995), The theory of electric traction, Transport Publ., Moscow (in Russian).
- [7] Traffic safety system for special self-propelled rolling stock of the II category ALS-MP. Manual. (in Russian).
- [8] Traffic safety system for special self-propelled rolling stock of the II category ALS-MP. Specifications. (in Ukrainian).
- [9] Vainu Ia. Ia.-F. (1977), Time series correlation, Statistika Publ., Moscow (in Russian).
- [10] Bolzhelarskyi Ya, Dovganiuk S, Bal O, Dzhus V. (2015), Experimental Determination of Special Self-Propelled Rolling Stock Deceleration from the Action of a Single Specific Deceleration Force, Zaliznychnyi transport Ukrainy, (in Ukrainian).
- [11] Bolzhelarskyi Ya, Dovganiuk S, Nabochenko O, (2014) Experimental determination of specific rolling resistance of movement of special self-propelled rolling stock. Zbirnyk naukovykh prats UkrDAZT. (in Ukrainian).