

ANDRZEJ KAŁUŻA

Urząd Regulacji Energetyki

ANDRZEJ SIKORA

Zakład Inżynierii Elektrycznej w Transporcie

ZAŁOŻENIA I WYNIKI SYMULACJI PRZEBIEGÓW RUCHU ORAZ PRZEBIEGÓW PARAMETRÓW ELEKTROMECHANICZNYCH POJAZDU NAPĘDZANEGO SILNIKAMI INDUKCYJNYMI

Streszczenie. W artykule przedstawiono założenia dla algorytmu bazowego niezbędnego do opracowania programu symulującego przejazd nowego tramwaju po modernizowanej linii tramwajowej. Linia ta charakteryzuje się licznymi pochyleniami osiągającymi wartość do 6%. Jako krok obliczeniowy przyjęto odcinek drogi nie większy niż 2 metry, co pozwoliło przyjąć stałą wartość siły napędowej i oporów ruchu w danym kroku obliczeniowym. Obliczenia przejazdu poprzedziły obliczenia parametrów hamowania w celu jednoznacznego określenia wszczęcia procesu hamowania w wymaganym miejscu trasy.

ASSUMPTIONS AND RESULTS OF THE MOTION COURSES AND COURSES OF ELECTROMECHANICAL QUANTITIES OF THE VEHICLE DRIVEN BY INDUCTION MOTORS

Summary. The paper presents the assumptions for the base algorithm, which is necessary to simulate a newly-designed tram car drive over a modernised track route. The route is characterised by numerous slopes up to 6%. The calculations step is the section of the route not longer than 2m, therefore it may be assumed that the tractive effort and resistance to motion throughout the step are constant. The calculations have been preceded by computations of the braking effort. These have been carried out in order to determine unequivocally the braking instant in the given place along the route.

1. WSTĘP

Podstawowym celem obliczeń symulujących przejazd pojazdu po danej trasie jest wyznaczenie jego parametrów ruchowych i parametrów obciążenia sieci trakcyjnej. Wykonanie takich obliczeń jest niezbędne w wypadku wprowadzania nowego taboru do

obsługi istniejącej lub modernizowanej linii tramwajowej. Prezentowane w artykule wyniki symulacji odnoszą się do przejazdów tramwajem produkcji Alstom-Konstal napędzanym silnikami indukcyjnymi. Tramwaj ten o układzie osi Bo2Bo posiada w części środkowej obniżoną podłogę co ułatwia możliwość korzystania z tramwaju osobom niepełnosprawnym

2. ALGORYTM BAZOWY DO PROGRAMU SYMULUJĄCEGO PRZEJAZD

2.1. Przyjęte oznaczenia

a_h [m/s^2]	- opóźnienie hamowania (aH),
a_p [m/s^2]	- przyspieszenie rozruchu określone dla siły wyznaczonej z charakterystyki pojazdu (a_p),
a [m/s^2]	- przyspieszenia,
dl [m]	- długość odcinka trasy stanowiąca krok obliczeniowy,
F [daN]	- siła na obwodach kół napędowych,
F_{ad} [daN]	- siła przyczepności przy rozruchu,
F_{adh} [daN]	- siła przyczepności przy hamowaniu (F_{adh}),
i [%]	- nachylenie danego odcinka,
k_w	- współczynnik mas wirujących ($k_w = 1,15$),
I [A]	- prąd tramwaju,
I_M [A]	- prąd obwodu głównego tramwaju,
I_{pom} [A]	- prąd pobierany przez obwody pomocnicze tramwaju,
l [m]	- odległość od przystanku (od początku odcinka),
l_{trasy} [m]	- metraż trasy,
m [t]	- masa tramwaju wraz z pasażerami (m_{tr}),
P_M [kW]	- moc rozwijana przez silniki trakcyjne (PM),
t [s]	- czas przejazdu od początku odcinka,
U_s [kV]	- napięcie sieci trakcyjnej ($U_s = 0,6$ kV),
U_{sh} [kV]	- napięcie sieci trakcyjnej w czasie hamowania ($U_{sh} = 0,75$ kV),
v [km/h]	- prędkość tramwaju,
v_{sr} [km/h]	- prędkość średnia tramwaju w kolejnym kroku obliczeniowym (v_{sr}),
v_{maxp} [km/h]	- prędkość maksymalna określona ograniczeniami,
W [daN]	- opory ruchu tramwaju,
w_0 [daN/t]	- jednostkowe zasadnicze opory ruchu (w_0),
w_i [daN/t]	- jednostkowe opory wzniesień (w_i),
w_l [daN/t]	- opory łuków (w_l),
η_M	- sprawność silnika ($\eta_M = 0,95$),
η_z	- sprawność przekładni ($\eta_z = 0,975$),
η_{prz}	- sprawność falownika napięcia ($\eta_{prz} = 0,975$),
$F = 5\ 250$ [daN]	- max siła przy rozruchu,
$m_{tr} = 36,6$ [t]	- masa tramwaju przy wypełnieniu 5 osób / m^2 ,
$m_{tr} = 47,86$ [t]	- masa tramwaju przy wypełnieniu 10 osób / m^2 ,
$I = I_M + I_{pom}$	

2.2. Przyjęte założenia dla algorytmu symulacji przejazdu

- Każdy fragment trasy podzielono na odcinki (dl), stanowiące krok obliczeniowy o długości wystarczająco małej, by dla wyznaczenia wielkości zależnych od prędkości i profilu trasy móc założyć, że pozostają one stałe na całej długości danego odcinka. Błędy spowodowane tym uproszczeniem są pomijalne. Kolejne iteracje wykonywane są dla każdego z otrzymanych w ten sposób odcinków charakteryzujących się określonymi lokalnymi oporami ruchu (w_i, w_l).
- Obliczenia przejazdu poprzedzono obliczeniami maksymalnej prędkości początkowej (v_{max_op}) dla każdego odcinka (dl), którą można zredukować do prędkości obowiązującej na następnym odcinku, biorąc pod uwagę możliwe do uzyskania na danym odcinku opóźnienie hamowania. Jeżeli mniejszą wartość ma prędkość wynikająca z przepisów, to jako obowiązującą przyjmuje się tę ostatnią. Obliczenia te rozpoczynano od ostatniego odcinka dl danego fragmentu trasy między przystankami lub między kolejnymi zatrzymaniami wymuszonymi organizacją ruchu.
- Założono również, że maksymalna siła hamowania jest równa sile przyczepności dla masy przyczepnej tramwaju odpowiadającej przyjętemu zapełnieniu i maksymalnej prędkości na trasie.
 $F_{adh} = 5015$ [daN] dla $m_{tr} = 47.86$ [t].

- Dla wyznaczenia jednostkowych zasadniczych oporów ruchu na każdym z odcinków dl przyjęto na tym etapie obliczeń, że prędkość średnia jest równa prędkości końcowej na danym odcinku, a tym samym prędkości początkowej następnego odcinka. Uproszczenie to nie wnosi istotnych błędów przy przyjętych wartościach $dl \approx 2$ [m], biorąc pod uwagę dokładność aproksymacji oporów ruchu.

$$w_0 = 2.57 + 52/m_{tr} + 0.014 * v_{sr} + 0.03588 * v_{sr} * v_{sr}/m_{tr}. \quad (1)$$

Założono również, że na ostatnim odcinku przyspieszenie hamowania jest nie mniejsze niż -1 [m/s^2] (tzn. jego wartość zawiera się w przedziale $(-1..0)$).

$$v_{max_op} = (v_{max}(j+1) * v_{max}(j+1) - 2 * dl * aH)^{0.5}, \quad (2)$$

$$aH = -((F_{adh} + (9.81 * i + w_0 + w_l) * m_{tr}) / (100 * k_w * m_{tr})). \quad (3)$$

- Jeżeli prędkość wyznaczona (2) jest większa od prędkości dopuszczalnej określonej przepisami, wówczas jako prędkość maksymalna na danym odcinku przyjmowana jest wartość mniejsza.
 Dysponując maksymalnymi prędkościami dla każdego odcinka dl wszczęto realizację odliczeń przejazdu obejmującego kolejne fazy ruchu tramwaju. W kolejnych krokach algorytmu, od pierwszego do ostatniego odcinka dl fragmentu trasy między przystankami wyznaczono: siłę, przyspieszenie, prędkość końcową, czas jazdy oraz prądy obciążenia tramwaju.
- Prędkość uzyskana na końcu każdego z odcinków musi umożliwić zwolnienie do prędkości obowiązującej na następnym odcinku.
- Dla pierwszego odcinka prędkość początkowa jest równa 0, dla pozostałych równa jest prędkości uzyskanej na końcu poprzedniego odcinka.

Dla uproszczenia obliczeń przy wyznaczaniu w_0 założono na tym etapie obliczeń, że prędkość średnia v_{sr} równa jest prędkości początkowej na danym odcinku:

$$v_{sr} = 3.6 * v_p; \% \text{ w km/h}, \quad (4)$$

Siła F została aproksymowana na podstawie następujących zależności:

$$F = 5250 \text{ [daN]} \quad \text{dla } v_{sr} \leq 38.3 \text{ [km/h]},$$

$$F = 360 * \eta_z * P_{mmax} / v_{sr} \quad (5)$$

dla $38.3 < v_{sr} < 41.07$ [km/h], oraz $P_{mmax} = 4 * 144$ [kW],

$$F = 6 * 10^6 * v_{sr}^{-1.9214} \quad \text{dla } v_{sr} > 41.07 \text{ [km/h]}, \quad (6)$$

$$w_i = 9.81 * i, \quad (7)$$

$$W = m_{tr} * (w_0 + w_i + w_l), \quad (8)$$

$$a_p = (F - W) / (100 * k_w * m_{tr}). \quad (9)$$

Na podstawie możliwego do uzyskania na danym odcinku przyspieszenia obliczona zostaje prędkość końcowa (v_k) na tym odcinku. Jeżeli jest ona większa od prędkości dopuszczalnej, to prędkość końcowa równa jest prędkości dopuszczalnej.

Dla prędkości początkowej v_p :

$$v_k = (v_p * v_p + 2 * dl * a)^{0.5}, \quad (10)$$

zatem przyspieszenie uwzględniające ograniczenie prędkości końcowej wynikające z przepisów:

$$a = (v_k * v_k - v_p * v_p) / (2 * dl), \quad (11)$$

skorygowana wartość siły:

$$F = a * (100 * k_w * m_{tr}) + W, \quad (12)$$

prędkość średnia:

$$v_{sr} = (v_p + v_k) / 2, \quad (13)$$

jeżeli pojazd hamuje:

$$a * (100 * k_w * m_{tr}) < 0, \quad (14)$$

$$PM = F * v_{sr} * \eta_z / 100, \quad (15)$$

$$IM = PM * \eta_M \eta_{prz} / U_{sh}, \quad (16)$$

natomiast jeżeli przyspiesza:

$$a * (100 * k_w * m_{tr}) \geq 0, \quad (17)$$

$$\text{to} \\ PM = F * v_{sr} / (\eta_z * 100), \quad (18)$$

$$i$$

$$IM = PM / (\eta_M * \eta_{prz} * U_s). \quad (19)$$

Przyjmując $I_{pom} = 105$ [A],

$$I = IM + I_{pom} \quad (20)$$

wartość przyspieszenia wyznaczyć można również z zależności:

$$a_{pop} = (v_k - v_p) / dt. \quad (21)$$

Tabela 1

Zestawienie parametrów trasy na odcinku międzyprzystankowym
Katowice Osiedle Tysiąclecia - Chorzów WPKiW

h	L	wl	m_tr	v max p	DI	i
[m]n	[m]	[daN]	[t]	[km/h]	[m]	[%]
274,36	7843,00			0		
274,64	7864,20	0,00	47,86	15	21,20	1,3%
274,84	7882,89	3,60	47,86	15	18,69	1,1%
275,04	7905,18	3,40	47,86	15	22,29	0,9%
275,16	7919,08	2,20	47,86	15	13,90	0,9%
275,31	7930,47	2,20	47,86	15	11,39	1,3%
275,87	7954,14	4,90	47,86	15	23,67	2,4%
276,19	7966,68	0,00	47,86	60	12,54	2,6%
277,21	8006,69	0,00	47,86	60	40,01	2,5%
278,46	8046,68	0,00	47,86	60	39,99	3,1%
279,86	8086,62	0,00	47,86	60	39,94	3,5%
281,28	8126,60	0,00	47,86	60	39,98	3,6%
282,66	8166,57	0,00	47,86	60	39,97	3,5%
284,10	8206,56	0,00	47,86	60	39,99	3,6%
285,53	8246,49	0,00	47,86	60	39,93	3,6%
287,06	8286,49	0,00	47,86	60	40,00	3,8%
288,40	8326,48	0,00	47,86	60	39,99	3,4%
289,39	8366,46	0,00	47,86	60	39,98	2,5%
289,93	8406,40	0,00	47,86	60	39,94	1,4%
289,88	8446,46	0,00	47,86	60	40,06	-0,1%
289,43	8486,45	0,00	47,86	60	39,99	-1,1%
288,95	8526,42	0,00	47,86	60	39,97	-1,2%
288,38	8566,41	0,00	47,86	60	39,99	-1,4%
287,85	8606,44	0,00	47,86	60	40,03	-1,3%
287,58	8646,44	0,00	47,86	60	40,00	-0,7%
287,78	8686,44	0,00	47,86	60	40,00	0,5%
288,05	8700,00	0,00	47,86	60	13,56	2,0%

Symulacje przejazdu nowym tramwajem przeprowadzono dla odcinka trasy o parametrach zestawionych w tabeli 1. W tabeli tej zestawiono dane dotyczące profilu odcinka trasy, oporów łuków, dopuszczalnej prędkości jazdy oraz masy tramwaju przy wypełnieniu wynoszącym 10 osób/m².

3. WYNIKI SYMULACJI PRZEJAZDU NOWYM TRAMWAJEM

Wyniki symulacji przejazdu nowym tramwajem na wybranym odcinku międzyprzystankowym linii tramwajowej Katowice-Bytom przedstawiono na rysunku 1, na którym naniesiono:

- a) przebiegi prędkości, ograniczeń prędkości i czasu przejazdu w funkcji drogi,
- b) przebiegi prędkości tramwaju i przebytej drogi w funkcji czasu,
- c) przebiegi prądu obwodu głównego tramwaju i prądu tramwaju oraz przyspieszenia w funkcji czasu,
- d) przebiegi prądu obwodu głównego tramwaju i prądu tramwaju oraz przyspieszenia w funkcji drogi.

Prąd tramwaju stanowi sumę prądu obwodu głównego i obwodów pomocniczych.

Na podstawie uzyskanych przebiegów prądów w funkcji czasu obliczono zużycie energii pobranej przez tramwaj na analizowanym odcinku trasy o długości 857 m.

Dla kierunku jazdy Katowice – Bytom (zgodnie z przebiegiem przedstawionym na rys.1) zużycie energii układu napędowego tramwaju (mierzone w obwodzie głównym prądu stałego) wynosi:

- bez zwrotu energii do sieci A_{K-B} (0 % rekup) = 5,21 [kWh],
- ze zwrotem energii do sieci A_{K-B} (100 % rekup) = 3,26 [kWh].

Dla kierunku przeciwnego (jazda na spadku z poziomu 288,05 m npm do 274,36 05 m npm):

- bez zwrotu energii do sieci A_{B-K} (0 % rekup) = 2,96 [kWh],
- ze zwrotem energii do sieci A_{B-K} (100 % rekup) = -1,14 [kWh].

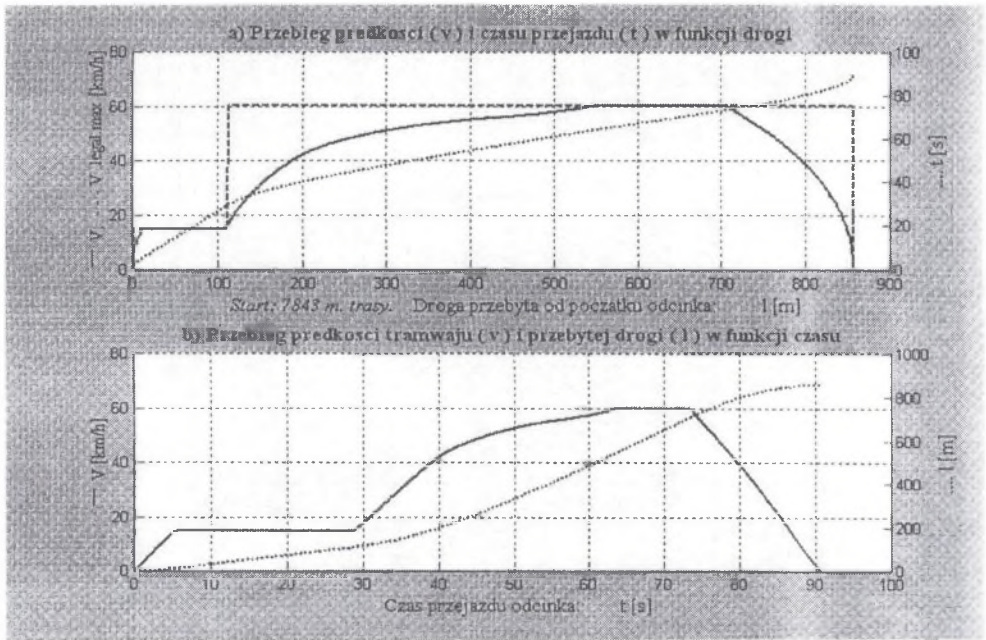
Jednostkowe zużycie energii związane z pracą układu napędowego (z pominięciem zużycia energii przez urządzenia pokładowe) łącznie dla obu kierunków jazdy wynosi:

- bez zwrotu energii do sieci:

$$j_0(0 \text{ \% rekup}) = 1000 \cdot (A_{K-B} + A_{B-K}) / (2 \cdot 1 \cdot m_{tr}) = 1000 \cdot (5,21 + 2,96) / (2 \cdot 0,857 \cdot 47,86) = 99,59 \text{ [Wh/tkm]},$$
- ze zwrotem energii do sieci:

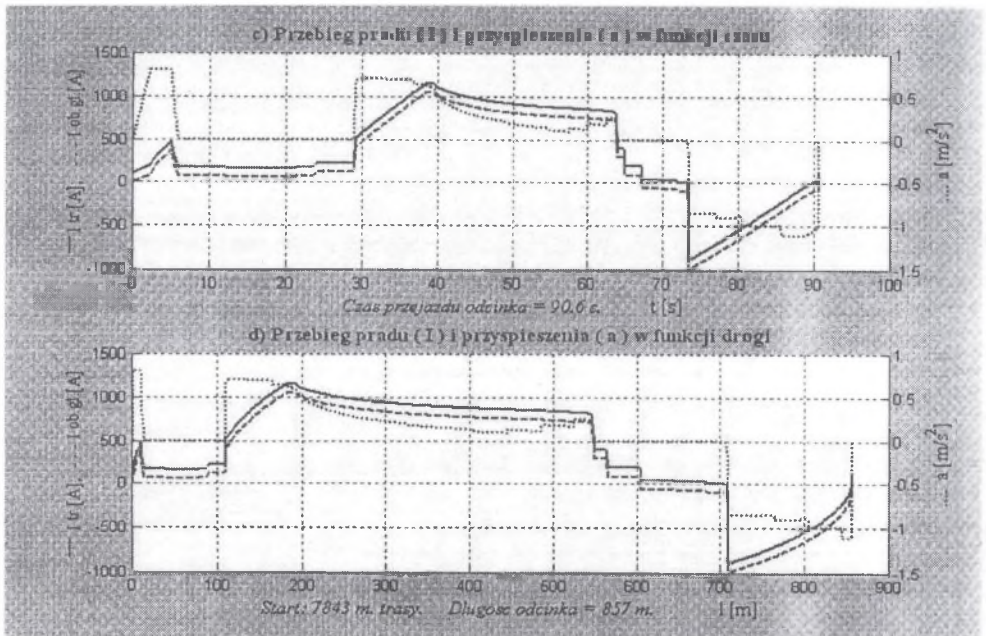
$$j_0(100 \text{ \% rekup}) = 1000 \cdot (3,26 - 1,14) / (2 \cdot 0,857 \cdot 47,86) = 25,84 \text{ [Wh/tkm]}.$$

- Maksymalny prąd pobierany przez tramwaj odpowiadający pracy układu napędowego i urządzeń pokładowych z pełną mocą (4 x 144 kW + 63 kW) wynosił 1161 A, zaś maksymalny prąd rekuperacji ok. 1000 A.
- Maksymalne przyspieszenie osiągnęło wartość $a_R \cong 1,3 \text{ m/s}^2$ w etapie pierwszej fazy rozruchu.
- Istnieje realna możliwość ograniczenia zużycia energii przez nowe tramwaje pod warunkiem przystosowania układu zasilania sieci trakcyjnej do przesyłu maksymalnej ilości rekuperowanej energii do innych tramwajów znajdujących się w obszarze zasilania nowych tramwajów. Stopień wykorzystania tej energii będzie także zależał od ograniczeń ruchu tramwajów, możliwości jej zwrotu do sieci elektroenergetycznej poprzez odpowiednio przystosowane podstacje trakcyjne, lub magazynowanie jej w zasobnikach energii.



Rys.1. Przebiegi parametrów ruchu tramwaju na odcinku międzyprzystankowym: Katowice Osiedle Tysiąclecia - Chorzów WPKiW

Fig.1. Courses of traction parameters between tramstops: Katowice Osiedle Tysiąclecia - Chorzów WPKiW



Rys.2. Przebiegi prądów obciążenia tramwaju na odcinku międzyprzystankowym: Katowice Osiedle Tysiąclecia - Chorzów WPKiW

Fig.2. Courses of tram's load current between: Katowice Osiedle Tysiąclecia - Chorzów WPKiW

LITERATURA

1. Podolski J.: Zasady trakcji elektrycznej. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności – Warszawa 1967.
2. Kasprzak J.: Teoria trakcji elektrycznej – Materiały do projektowania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej. Warszawa 1996.
3. Kałuza E.: Zbiór zadań i ćwiczeń projektowych z trakcji elektrycznej. Skrypt Politechniki Śląskiej nr 1848 Gliwice 1994.
4. Czakański M.: Sprawozdanie z realizacji Projektu Badawczego „Synteza cyfrowego systemu sterowania tramwaju napędzanego silnikami indukcyjnymi”. Gliwice 1998.

Recenzent: Dr hab.inż. Jerzy Mikulik

Wpłynęło do Redakcji 4 kwietnia 2000 r.

Abstract

The basic goal of the calculations simulating vehicle drive on a given track is determination of traction parameters of the vehicle and the load parameters of the contact system. Such calculations are indispensable when new rolling stock is introduced to a new or modernised tram line. The calculations were carried out for a tram car with induction motor drive manufactured by ALSTOM-KONSTAL. The following assumptions were made:

- each part of the route was divided into sections (dl). Every section constitutes a single step in calculations. The length of the section is short enough to assume that the velocity and route contour are constant throughout the section
- the initial calculations were these of initial maximum speed (v_{max_op}) for each section (dl). This speed may be reduced to the speed required at the next section, taking into account the braking deceleration possible in the section
- the maximum braking effort is equal to the tractive adhesion for the adhesive weight of the tramcar fully loaded and driving with a maximum speed
- in order to determine the specific train resistance for every dl section it was assumed that the average speed is equal to the final speed at a given section, i.e. the initial speed at the next section
- the speed reached at the end of each section must make possible the deceleration down to the speed required at each section
- for the first section the initial speed is equal to 0. For the remaining sections, the initial speed is equal to the final speed of the preceding section.

The calculations of a tram drive were carried out for a route of 857m. The route's parameters have been set out in Table 1. The data including route contour, resistance to motion at curves, the admissible drive speed and tramcar weight (10 persons to a square meter) have been given. The results of computer simulation at a chosen part of the tram route between Katowice and Bytom have been depicted in Fig.1.

Figure 1 presents the following diagrams:

- a) the courses of speed, speed limitations and driving time vs. distance covered
- b) the courses of tram speed and distance covered vs. time
- c) the courses of tram motor current and tram line current and acceleration vs. time
- d) the courses of tram motor current and line current and acceleration vs. distance

The tram line current is the sum of motor current and auxiliaries current.

- The maximum current of the tram, i.e. current at full load ($4 \times 144 \text{ kW} + 63 \text{ kW}$) was 1161A, and maximum recuperation current was *c.* 1000A
- The maximum acceleration was $a_R \cong 1,3 \text{ m/s}^2$ during the initial moments of the start-up
- It is possible to reduce the energy consumption of the new trams, provided that the traction supply system is adopted, so that the maximum recuperated energy is redistributed among other trams currently driving in the same supply area.