

Adam St. JAGIEŁŁO, Marek DUDZIK

POLITECHNIKA KRAKOWSKA, WYDZIAŁ INŻYNIERII ELEKTRYCZNEJ I KOMPUTEROWEJ, KATEDRA TRAKCJI I STEROWANIA RUCHEM, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, Polska

Wpływ prędkości przemieszczania się pantografu wzdłuż sieci jezdnej na układ odbierak prądu - sieć trakcyjna

Prof. dr hab. inż. Adam St. JAGIEŁŁO

Prof. dr hab. inż. Adam Stanisław Jagiełło jest pracownikiem naukowym Politechniki Krakowskiej i pełni obecnie funkcję dziekana na wydziale Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej oraz kierownika katedry Trakcji i Sterowania Ruchem. W ostatnim okresie zajmuje się analizą układów elektromechanicznych w szczególności z więzami nieholonomicznymi oraz modelowaniem magnesowania materiałów ferromagnetycznych miękkich.



e-mail: pejagiel@cyf-kr.edu.pl

Mgr inż. Marek DUDZIK

Mgr inż. Marek Dudzik jest pracownikiem naukowo dydaktycznym Politechniki Krakowskiej, Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej. W ostatnim okresie zajmuje się między innymi zagadnieniami związanymi ze sztucznymi sieciami neuronowymi.



e-mail: marekdudzik@pk.edu.pl

Streszczenie

W pracy przedstawiono zagadnienie modelowania układu drgającego odbierak prądu – sieć trakcyjna jako modelu fizycznego z masą skupioną sieci trakcyjnej. Do celów symulacyjnych spośród wielu istniejących modeli pantografów wybrano model WBL 85 3 kV, który to między innymi posiadają lokomotywy EU11 oraz EU43. Zaprezentowano również wyniki wstępnych symulacji dla tego modelu przy wybranych prędkościach chwilowych ruchu postępowego odbieraka prądu wzdłuż sieci jezdnej. Badany model odbieraka prądu przyjęto jako układ o czterech stopniach swobody, natomiast masę sieci jezdnej przyjęto jako masę skupioną w funkcji położenia zależnego od czasu.

Słowa kluczowe: odbierak prądu, pantograf, model sieci jezdnej, OPST.

Impact of the velocity of a pantograph traversing along the catenary on the pantograph - catenary system

Abstract

With increase in the traction vehicle velocity, the quality requirements related to the vehicle power consumption also rise [2]. In order to ensure the continuous and uninterrupted energy supply to a traction unit, the maintained constant force between a pantograph and a catenary is recommended [3]. In addition, a value of the force needs to be proper because if it is small, the pantograph detachment from the catenary can occur easier. If the value is high, frictional wear of the catenary or pantograph slipper increases. The dynamic model of the pantograph with a catenary depends, inter alia, on an instantaneous pantograph velocity which corresponds to the traction unit velocity if the pantograph is constantly situated on the vehicle; parameters such as pantograph stiffness, pantograph attenuation coefficients, masses of the pantograph elements as well as catenary parameters. In addition, the dynamic model also depends on external coefficients which affect the modeled catenary and the modeled pantograph. In the paper there is presented a pantograph – catenary vibration model as a physical model. The pantograph is modeled as a structure with four degrees of freedom. The catenary is a concentrated mass modeled as a function of the time-dependent position. For the simulation purposes the WBL 85 3 kV pantograph model was chosen. The paper presents also preliminary simulation results for this model for chosen velocities of the pantograph traversing along the catenary. The chosen velocities were 10 m/s, 20 m/s and 30 m/s. The simulations were performed for zero initial conditions.

Keywords: pantograph, catenary model, OPST.

1. Wstęp

Wraz ze zwiększeniem prędkości jazdy pojazdów trakcyjnych wzrastają wymagania jakościowe związane z poborem energii elektrycznej przez te pojazdy [2]. Pobór ten następuje za pośrednictwem przemieszczającego się styku odbieraka prądu z przewodem jezdny sieci trakcyjnej [2]. W celu zapewnienia ciągłych i niezakłóconych dostaw energii do pojazdu trakcyjnego, dąży się

do utrzymania stałej wartości siły nacisku odbieraka prądu na sieć trakcyjną [3].

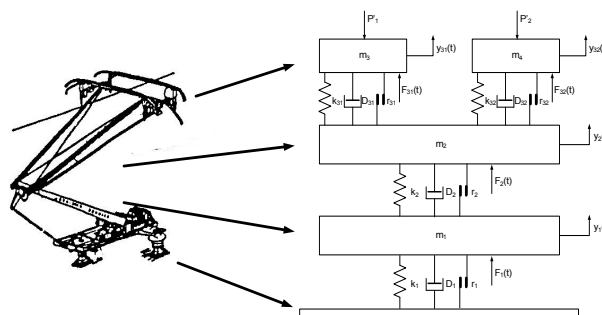
Modelowanie opisywanego układu pod względem właściwości dynamicznych jest zadaniem złożonym, na które mają wpływ między innymi prędkość pojazdu trakcyjnego, parametry układu OPST, parametry spoza układu OPST i czynniki zakłócające związane ze środowiskiem układu OPST takie jak: charakterystyka geometryczna toru i jej zmiany występujące w okresie eksploatacji, warunki atmosferyczne, jak na przykład temperatura powietrza oraz jego wilgotność, oblodzenie drutu jezdny i lin sieci, prędkości wiatru i zmiany jego kierunku oraz inne czynniki zakłócające [3].

Dlatego też optymalizacja parametrów układu odbierak prądu – sieć trakcyjna wymaga prowadzenia badań i szczegółowych analiz [1].

W pracy dokonano próby zbadania zjawisk dynamicznych wywołanych oddziaływaniem odbieraka prądu na sieć trakcyjną, zgodne z ideą opisaną w publikacjach [1] i [2].

2. Model odbieraka prądu i sieci jezdnej

Na rysunku 1 przedstawiono model fizyczny odbieraka prądu o czterech stopniach swobody, w skład którego wchodzi: rama dolna, rama górna i ślizgacz, na którym zamocowane są dwie listwy ślizgowe. Model ten składa się z czterech efektywnych mas ruchomych, które reprezentują wymienione części składowe. Połączone są one ze sobą za pomocą sił sprężynowania i tłumienia. Masy efektywne, sprężyny i tłumiki dopasowywane są do rzeczywistego zachowania się odbieraka w warunkach dynamicznych.



Rys. 1. Model odbieraka prądu. (Ilustracja z lewej strony [7])
Fig. 1. Pantograph model. (illustration on the left side [7])

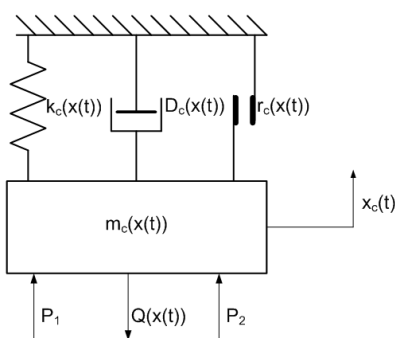
Dynamiczne właściwości odbieraka prądu określone są przez następujące parametry [1]:

– masa skupiona (zredukowana do punktu styku z przewodem jezdny),

- statyczna siła nacisku odbieraka na przewód jezdny,
- siła aerodynamiczna,
- sztywność układu odsprężynowania ślizgacza,
- siła tarcia suchego występująca na skutek istnienia oporów w przegubach,
- siła elektrodynamiczna.

Do opisu modelu fenomenologicznego odbieraka prądu zilustrowanego na rys. 1 przyjęto następujące oznaczenia parametrów i wielkości [4]: P'_1, P'_2 – siły związane z wzajemnym oddziaływaniem sieci jezdnej i ślizgacza odbieraka prądu, $F_{31}(t), F_{32}(t)$ – siły aerodynamiczne działające na ślizgacz odbieraka prądu podczas ruchu postępowego pojazdu, k_{31}, k_{32} – współczynniki sztywności elementu ślizgacza odbieraka prądu umiejscowionego między ślizgaczem odbieraka prądu a górnym ciągnem pantografu, D_{31}, D_{32} – współczynniki tłumienia elementu umiejscowionego pomiędzy ślizgaczem odbieraka prądu a górnym ciągnem pantografu, r_{31}, r_{32} – współczynniki tłumienia elementu ciernego ślizgacza odbieraka prądu umiejscowionego między ślizgaczem odbieraka prądu a górnym ciągnem pantografu, k_2 – współczynnik sztywności elementu ślizgacza odbieraka prądu umiejscowionego między górnym a dolnym ciągnem pantografu, D_2 – współczynnik tłumienia elementu umiejscowionego pomiędzy górnym a dolnym ciągnem pantografu, r_2 – współczynnik tłumienia elementu ciernego ślizgacza odbieraka prądu umiejscowionego pomiędzy górnym a dolnym ciągnem pantografu, k_1 – współczynnik sztywności elementu ślizgacza odbieraka prądu, umiejscowiona pomiędzy dolnym ciągnem pantografu a ramą pojazdu, D_1 – współczynnik tłumienia elementu umiejscowionego pomiędzy dolnym ciągnem pantografu a ramą pojazdu, r_1 – współczynnik tłumienia elementu ciernego ślizgacza odbieraka prądu umiejscowionego pomiędzy dolnym ciągnem pantografu a ramą pojazdu, $F_2(t)$ – siła aerodynamiczna działająca na górne ciągnie pantografu podczas jazdy, $F_1(t)$ – siła statyczna oddziaływania układu podnoszenia odbieraka prądu na sieć trakcyjną, m_1 – masa dolnego cięgna pantografu, m_2 – masa górnego cięgna pantografu, m_3, m_4 – masy skupione układu ślizgacza odbieraka prądu.

Rysunek 2 przedstawia model układu sieci jezdnej, uwzględniający chwilową wartość masy zredukowanej jako funkcję określoną związkami (3a).



Rys. 2. Dyskretny model fenomenologiczny sieci jezdnej
Fig. 2. Catenary discrete phenomenological model

Założenia do modelu sieci jezdnej zostały sformułowane przez autora pracy w następujący sposób:

- Układ wykonuje tylko drgania pionowe,
- Układ sieci jezdnej jest układem symetrycznym,
- Odległość między przęsłami sieci jezdnej jest stała i określona,
- Przewód jezdny wykonany jest z jednorodnego materiału,
- Materiały wykorzystane do budowy sieci jezdnej są anizotropowe,
- Zastępcze parametry mechaniczne sieci jezdnej zmieniają się w sposób periodyczny i spełniają warunki Dirichleta,

Do opisu modelu dyskretnego sieci jezdnej przyjęto następujące parametry: $m_c(t)$ – funkcja masy sieci jezdnej, $D_c(t)$ – funkcja tłumienia wiskotycznego sieci jezdnej, $k_c(t)$ – funkcja sztywności sieci jezdnej, $r_c(t)$ – funkcja tłumienia ciernego sieci jezdnej, P_1, P_2 – siły związane z wzajemnym oddziaływaniem ślizgacza

odbieraka prądu i sieci jezdnej, $Q(t)$ – wartość chwilowa ciężaru sieci jezdnej oddziałującego na ślizgacz odbieraka prądu, L – odległość między przęsłami sieci jezdnej, $x(t)$ – odległość chwilowa od przęsła referencyjnego, mierzona wzdłuż sieci jezdnej, $v(t)$ – prędkość chwilowa ruchu postępowego odbieraka prądu, mierzona w kierunku wzdłużnym sieci jezdnej, a – przyspieszenie ruchu postępowego odbieraka prądu, mierzona w kierunku wzdłużnym sieci jezdnej, V_0 – prędkość początkowa ruchu postępowego odbieraka prądu, mierzona w kierunku wzdłużnym sieci jezdnej, x_0 – odległość początkowa od przęsła referencyjnego, mierzona w kierunku wzdłużnym sieci jezdnej.

W prowadzonej pracy modelowej uwzględniono między innymi wpływ siły aerodynamicznej na odbierak prądu, co zazwyczaj dla bardziej ubogich modeli jest pomijane. Jednocześnie model prezentowany na rysunku 1 nie bierze pod uwagę wpływu drgań pojazdu trakcyjnego na drganie podstawy odbieraka prądu. W rzeczywistości drgania nadwozia lokomotywy są bezpośrednio przekazywane na podstawę odbieraka prądu (pierwsza strzałka od dołu na rys. 1).

Do opisu drgań układu przyjęto współrzędne określające przemieszczenia względem położenia równowagi poszczególnych brył układu.

Model matematyczny dla przyjętego w pracy modelu odbieraka prądu prezentuje (1).

$$\begin{aligned}
 m_3 \frac{d^2 y_{31}}{dt^2} + D_{31} \left(\frac{dy_{31}}{dt} - \frac{dy_2}{dt} \right) + k_{31} (y_{31} - y_2) + r_{31} \cdot \operatorname{tgh} \left[\kappa \cdot \left(\frac{dy_{31}}{dt} - \frac{dy_2}{dt} \right) \right] &= \\
 -P'_1 + F_{31}(t) & \\
 m_4 \frac{d^2 y_{32}}{dt^2} + D_{32} \left(\frac{dy_{32}}{dt} - \frac{dy_2}{dt} \right) + k_{32} (y_{32} - y_2) + r_{32} \cdot \operatorname{tgh} \left[\kappa \cdot \left(\frac{dy_{32}}{dt} - \frac{dy_2}{dt} \right) \right] &= \\
 -P'_1 + F_{32}(t) & \\
 m_2 \frac{d^2 y_2}{dt^2} + D_2 \left(\frac{dy_2}{dt} - \frac{dy_1}{dt} \right) + k_2 (y_2 - y_1) + r_2 \cdot \operatorname{tgh} \left[\kappa \cdot \left(\frac{dy_2}{dt} - \frac{dy_1}{dt} \right) \right] & \\
 -D_{31} \left(\frac{dy_{31}}{dt} - \frac{dy_2}{dt} \right) - k_{31} (y_{31} - y_2) - r_{31} \cdot \operatorname{tgh} \left[\kappa \cdot \left(\frac{dy_{31}}{dt} - \frac{dy_2}{dt} \right) \right] &= F_2 \\
 -D_{32} \left(\frac{dy_{32}}{dt} - \frac{dy_2}{dt} \right) - k_{32} (y_{32} - y_2) - r_{32} \cdot \operatorname{tgh} \left[\kappa \cdot \left(\frac{dy_{32}}{dt} - \frac{dy_2}{dt} \right) \right] &= F_2 \\
 m_1 \frac{d^2 y_1}{dt^2} + D_1 \frac{dy_1}{dt} + k_1 \cdot y_1 + r_1 \cdot \operatorname{tgh} \left[\kappa \cdot \left(\frac{dy_1}{dt} \right) \right] - D_2 \left(\frac{dy_2}{dt} - \frac{dy_1}{dt} \right) & \\
 -k_2 (y_2 - y_1) - r_2 \cdot \operatorname{tgh} \left[\kappa \cdot \left(\frac{dy_2}{dt} - \frac{dy_1}{dt} \right) \right] &= F_1
 \end{aligned} \quad (1)$$

Model matematyczny dla przyjętego w pracy modelu sieci jezdnej prezentuje (2), przy czym warto zauważyć, że w równaniu tym uwzględnia się wpływ iloczynu pochodnej czasowej masy i prędkości na zachowanie się układu OPST.

$$\begin{aligned}
 m_c(x(t)) \cdot \frac{d^2 x_c(t)}{dt^2} + \frac{dm_c(x(t))}{dx(t)} \cdot \frac{dx(t)}{dt} \cdot \frac{dx_c(t)}{dt} + D_c(x(t)) \cdot \frac{dx_c(t)}{dt} & \\
 + r_c \cdot \operatorname{tgh}(\kappa \cdot \frac{dx_c(t)}{dt}) + k_c(x(t)) \cdot x_c(t) = P_1 + P_2 - Q(x(t)) &
 \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

$$m_c(x(t)) = m_{co} + \sum_{i=1}^3 m_{ci} \cdot \cos\left(\frac{2\pi i}{L} \cdot x(t)\right) \quad (3a)$$

$$D_c(x(t)) = D_{co} + \sum_{i=1}^3 D_{ci} \cdot \cos\left(\frac{2\pi i}{L} \cdot x(t)\right) \quad (3b)$$

$$k_c(x(t)) = k_{co} + \sum_{i=1}^3 k_{ci} \cdot \cos\left(\frac{2\pi i}{L} \cdot x(t)\right) \quad (3c)$$

Droga w funkcji czasu:

$$\begin{aligned} x(t) &= a \cdot t^2 + v(t) \cdot t + x_0 \\ v(t) &= a \cdot t + v_0 \end{aligned} \quad (4)$$

Siły działające na sieć jezdnią:

$$Q(x(t)) = m_c(x(t)) \cdot g \quad (5)$$

Gdy $\text{sign}(P_1) > 0$:

$$P_1 = F_{31}(t) + k_{31}(y_2(t) - y_{31}(t)) + D_{31} \left(\frac{dy_2(t)}{dt} - \frac{dy_{31}(t)}{dt} \right) \quad (6)$$

W przeciwnym wypadku: $P_1 \equiv 0$

Gdy $\text{sign}(P_2) > 0$:

$$P_2 = F_{32}(t) + k_{32}(y_2(t) - y_{32}(t)) + D_{32} \left(\frac{dy_2(t)}{dt} - \frac{dy_{32}(t)}{dt} \right) \quad (7)$$

W przeciwnym wypadku: $P_2 \equiv 0$

Siły działające na odbierak prądu:

Gdy $\text{sign}(P_1) > 0$, $\text{sign}(P_2) > 0$:

$$P'_1 + P'_2 = Q(x(t)) + k_c(y_2(t) - x_c(t)) + D_c \left(\frac{dy_2(t)}{dt} - \frac{dx_c(t)}{dt} \right) \quad (8)$$

$$P'_1 = P'_2 = 0.5 \cdot \left[Q(x(t)) + k_c(y_2(t) - x_c(t)) + D_c \left(\frac{dy_2(t)}{dt} - \frac{dx_c(t)}{dt} \right) \right]$$

Gdy $\text{sign}(P_1) > 0$, $\text{sign}(P_2) \leq 0$:

$$P'_1 = Q(x(t)) + k_c(y_2(t) - x_c(t)) + D_c \left(\frac{dy_2(t)}{dt} - \frac{dx_c(t)}{dt} \right) \quad (9a)$$

$$P'_2 \equiv 0$$

Gdy $\text{sign}(P_2) > 0$, $\text{sign}(P_1) \leq 0$:

$$P'_2 = Q(x(t)) + k_c(y_2(t) - x_c(t)) + D_c \left(\frac{dy_2(t)}{dt} - \frac{dx_c(t)}{dt} \right) \quad (9b)$$

$$P'_1 \equiv 0$$

W przeciwnym wypadku:

$$P'_1 = P'_2 \equiv 0 \quad (10)$$

Siły aerodynamiczne działające na odbierak prądu:

$$\begin{aligned} F_{31}(t) &= K_{31} \cdot v^2(t) \\ F_{32}(t) &= K_{32} \cdot v^2(t) \\ F_2(t) &= K_2 \cdot v^2(t) \end{aligned} \quad (11)$$

3. Wyniki symulacji

Spośród wielu istniejących modeli pantografów do celów symulacyjnych wybrano model WBL 85 3kV. Model ten został umieszczony między innymi na lokomotywach EU11 i EU43 [4]. Wartości parametrów dla tego modelu zostały zaczerpnięte z pozycji literatury [4].

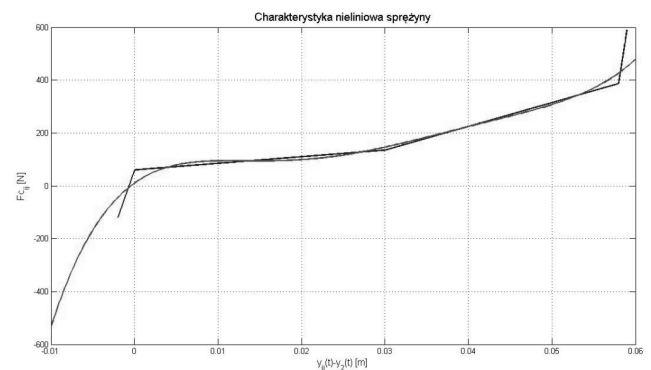
W pracy analizę ruchu zaprezentowano dla przedstawionego modelu odbieraka współpracującego z siecią jezdnią reprezentowaną przez równanie (2). Symulacje przeprowadzono przyjmując następujące założenia [4]:

- układ wykonuje tylko drgania pionowe,
- tłumienie w parach kinematycznych odbieraka prądu ma charakter tarcia suchego, jak również wiskotycznego,
- elementy łączące masy zredukowane ramion odbieraka m_1, m_2 mają charakterystykę liniową o stałych współczynnikach k_2, D_2, r_2 ,
- elementy łączące dolną masę m_1 z podstawą odbieraka mają charakterystykę liniową o stałych współczynnikach k_1, D_1, r_1 ,
- elementy sprężyste łączące masy zredukowane ślizgaczy m_3, m_4 i ramienia górnego odbieraka m_2 posiadają charakterystykę nieliniową [4], aproksymowaną zgodnie z równaniem (12),
- wartość siły statycznej $F_1(t)$ oddziaływania układu podnoszenia odbieraka prądu na sieć trakcyjną jest taka sama przy każdej prędkości oraz nie zależy od położenia bryły o masie m_1 ,
- prędkość v poruszania się odbieraka jest stała,
- drgania układu odbywają się wokół położenia równowagi statycznej wynikającej z działania sił ciężkości i składowej stałej oddziaływania sieci na odbierak.

W obliczeniach związanych z modelem układu OPST przyjęto następujące parametry odbieraka prądu [4]:

Masa, kg	Masa, kg	Tłumienie wiskotyczne, kg/s
$m_1=10.15$	$k_{31}=13500$	$D_1=60$
$m_2=8.73$	$k_{32}=13500$	$D_2=0$
$m_3=7.93$	$k_2=13500$	$D_{31}=0$
$m_4=7.93$	$k_1=13500$	$D_{32}=0$
Tłumienie suche, N	Współczynniki oporu powietrza, kg/m	Siła statyczna, N
$r_1=2.5$	$K_{31}=0.36 \cdot 0.7$	$F_1=110$
$r_2=2.5$	$K_{32}=0.36 \cdot 0.7$	
$r_{31}=2$	$K_2=0.36 \cdot 0.7/3$	
$r_{32}=2$		
$\kappa = 1000$		

Na rysunku 3 została przedstawiona charakterystyka nieliniowa sprężyny odpowiadającej elementom k_{31}, k_{32} modelu odbieraka prądu [4] (rys. 1).



Rys. 3. Polilinia - charakterystyka sprężyny odpowiadającej elementom c_{31}, c_{32} modelu odbieraka prądu (Rys. 1) [4]. Krzywa ciągła - rezultat aproksymacji polilini

Fig. 3. Polyline - spring characteristic corresponding to elements c_{31}, c_{32} of the pantograph model (Fig. 1) [4]. Continuous curve - the result of approximation of the polyline

Rezultat aproksymacji charakterystyki sprężyny elementów c_{31}, c_{32} modelu odbieraka prądu (rys. 1) [4] w postaci wielomianu przedstawia (12):

$$F(y_{ij} - y_2) = p_1 \cdot (y_{ij} - y_2)^5 + p_2 \cdot (y_{ij} - y_2)^4 + p_3 \cdot (y_{ij} - y_2)^3 + p_4 \cdot (y_{ij} - y_2)^2 + p_5 \cdot (y_{ij} - y_2) + p_6; \quad (12)$$

$i = 3, j = 1, 2$

gdzie:

$$p_1 = 1.0146e+010 \quad p_2 = -1.5768e+009 \quad p_3 = 8.9708e+007$$

$$p_4 = -2.1395e+006 \quad p_5 = 22335 \quad p_6 = 11.192$$

Parametry sieci jezdnej przyjęto jak w pozycjach [5, 6]. Posiadają one następujące wartości:

Masa, kg	Szywność, N/m	Tłumienie wiskotyczne, kg/s
$m_{c0}=195$	$k_{c0}=7000$	$D_{c0}=240$
$m_{c1}=100$	$k_{c1}=3360$	$D_{c1}=240$
$m_{c2}= 20$	$k_{c2}= 650$	$D_{c2}= 50$
$m_{c3}= 5$	$k_{c3}= 160$	$D_{c3}= 12$

Tłumienie suche, N Odległość między przęsłami sieci jezdnej, m

$$r_c = 0 \quad L = 65.52$$

$$a = 0 \text{ m/s}^2$$

$$x_0 = 0 \text{ m}$$

$$V_0 = \text{zgodnie z komentarzem na wykresach symulacyjnych m/s}$$

Symulacje współpracy układu odbierak prądu – sieć trakcyjna zostały wykonane między innymi dla trzech prędkości $V_0 = 10, 20$ i 30 m/s i czasu symulacji równego 19656 s . Czas ten stanowi odpowiednik kolejno trzykrotnego, sześciokrotnego i dziewięciokrotnego przebycia założonej odległości między przęsłami sieci.

Każda z symulacji została wykonana dla warunku początkowego położenia pantografu, znajdującego się na początku referencyjnego przęsła sieci jezdnej, przyjętego jako położenie początkowe równe 0.

Tabela 1 przedstawia funkcję masy skupionej sieci jezdnej i jej pochodnej względem odległości chwilowej odbieraka prądu mierzonej od przęsła referencyjnego dla wybranych prędkości V_0 .

Tab. 1. Funkcja masy skupionej sieci jezdnej i jej pochodnej względem odległości chwilowej odbieraka prądu mierzonej od przęsła referencyjnego dla wybranych prędkości V_0

Tab. 1. The function of the catenary concentrated mass and its $x(t)$ distance derivative for the chosen V_0

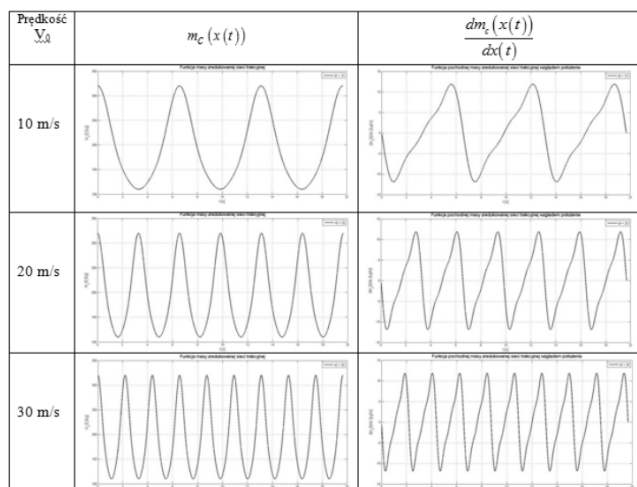
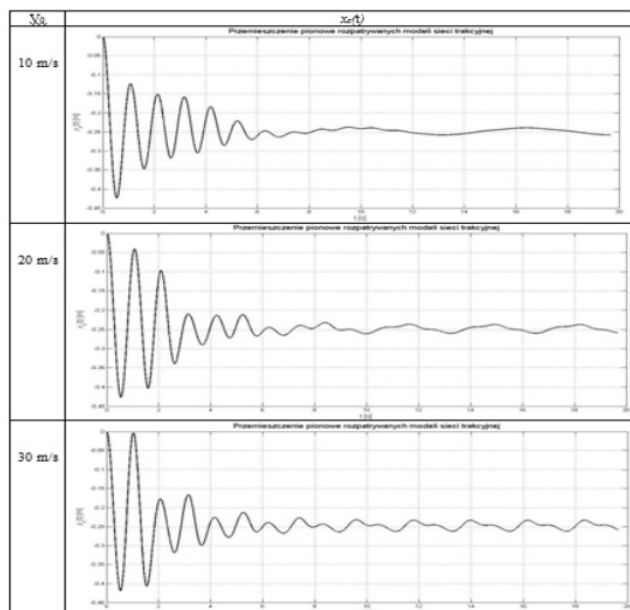


Tabela 2 przedstawia przebiegi czasowe przemieszczeń pionowych sieci jezdnej dla prędkości V_0 poruszania się odbieraka prądu wzdłuż sieci jezdnej równej odpowiednio $10, 20, 30 \text{ m/s}$. Przebiegi te otrzymano z przeprowadzonych wstępnych symulacji w środowisku Matlab.

Tab. 2. Przemieszczenie pionowe rozpatrywanego modelu sieci jezdnej we współpracy z modelem odbieraka WBL 85 3 kV

Tab. 2. Vertical displacement of the considered catenary model in cooperation with the pantograph WBL 85 3 kV model



Na podstawie wyników przeprowadzonej symulacji przy zadanej prędkości $V_0=10, 20, 30 \text{ m/s}$ stwierdzić można, że przemieszczenie pionowe sieci jezdnej posiada charakter zmienny w czasie i można je podzielić na dwa przedziały czasowe. W przedziałach tych dominuje składowa przejściowa sygnału odpowiedzi układu bądź jego składowa ustalona.

W przedziałach czasowych z dominacją składowej przejściowej przebieg sygnału ma charakter aperiodyczny tłumiony.

Przedziały te przy poszczególnych prędkościach $V_0= 10, 20, 30 \text{ m/s}$ określają zakresy czasowe zapisane w tabeli 3.

Tab. 3. Przedział czasowy przemieszczenia pionowego z dominacją składowej przejściowej rozpatrywanego modelu sieci jezdnej we współpracy z odbierakiem prądu

Tab. 3. Vertical displacement time interval with domination of transitional of the considered catenary model in cooperation with the pantograph

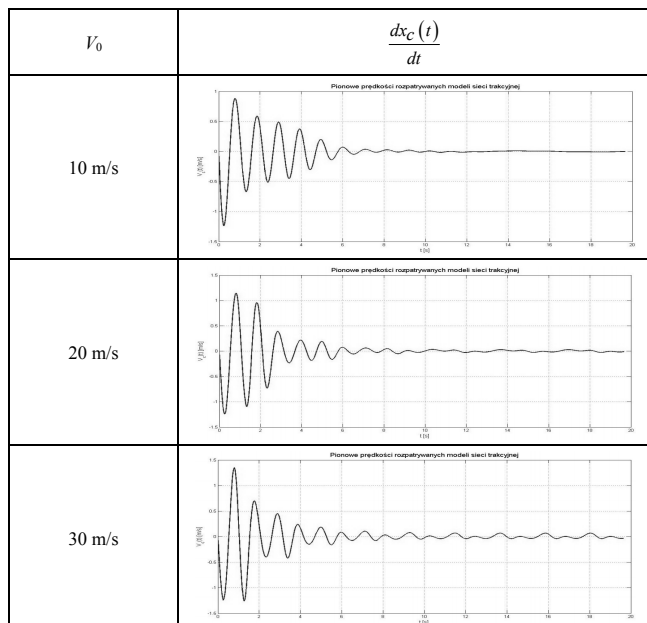
Prędkość V_0	Przedział czasowy z dominacją składowej przejściowej
10 m/s	Od 0 do około 7,5 sekundy
20 m/s	Od 0 do około 7,5 sekundy
30 m/s	Od 0 do około 7,5 sekundy

Jak można zauważyć, niezależnie od prędkości V_0 sygnały czasowe składowej przejściowej ulegają zanikowi w chwili czasu bliskiej 7,5 sekundy. Sugeruje to brak istnienia związku pomiędzy prędkością V_0 a przedziałem czasowym, w którym następuje zanik wpływu składowej przejściowej, bądź też nieznaczny jego wpływ.

Na podstawie tej analizy można wysnuć hipotezę, że przedział czasowy, w którym występuje składowa przejściowa, może wynikać z nie dobranych warunków początkowych, co jest związane z początkowym obniżeniem sieci trakcyjnej pochodzącym od sił masowych. W celu potwierdzenia tej hipotezy w tabeli 4 zamieszczono wyniki symulacji dla prędkości pionowych rozpatrywanego modelu sieci jezdnej we współpracy z badanym modelem odbieraka prądu, które wskazują na analogiczne zjawisko. Na podstawie otrzymanych wyników zdecydowano, że dalszej analizie należy poddać przedział czasowy po 7,5 sekundowym upływie czasu symulacji, po którym to zauważalny jest istotny udział składowej ustalonej przebiegów. Przy jednoczesnym zwróceniu uwagi na istotność doboru warunków początkowych do układu.

Tab. 4. Przebiegi prędkości pionowych rozpatrywanego modelu sieci jezdnej we współpracy z modelem odbieraka WBL 85

Tab. 4. Vertical velocity waveforms of the considered catenary model in cooperation with the pantograph WBL 85 model



4. Podsumowanie

W pracy oddziaływania przewodu jezdnej przyjęto jako wymuszenia siłowe. Uwzględniono utratę kontaktu ślizgaczy odbieraka prądu z przewodem jezdny. Uwzględniono wpływ sił aerodynamicznych oddziaływujących na odbierak prądu. Jest to szczególnie istotne wobec tego, że elementy konstrukcyjne odbieraka prądu w warunkach jazdy wywołują zawirowania, których oddziaływanie wpływa na drgania pantografu. W modelowaniu odbieraka prądu przyjęto uproszczenie związane z pominięciem wpływu drgań pojazdu na ruchy pionowe pantografu. Prezentowany model fenomenologiczny i matematyczny odbieraka prądu utworzono w sposób uwzględniający zdecydowaną większość czynników i parametrów opisywanych w literaturze jako istotnych, celem możliwości jego wykorzystania w jak najszerszym zakresie.

Na podstawie wyników otrzymanych symulacji stwierdżyć można, że dobór warunków początkowych układu współpracy odbieraka prądu z modelem skupionym sieci trakcyjnej zależnym od położenia względem przesła referencyjnego może mieć istotne znaczenie dla analiz czasowych związanych z odpowiedzią układu OPST. Brak wykonania tego zabiegu wymaga konieczności analiz przebiegów po czasie, w którym to wpływ składowej przejściowej pochodzącej od braku założenia warunków początkowych jest do pominięcia.

W przypadku wyników symulacji zaprezentowanych w pracy przyjęto, że czasem tym będzie wartość $t = 11$ sekund. Po tym czasie zauważalna jest składowa ustalona przebiegów czasowych. Składowa ta posiada charakter sygnału okresowego, zmiennego w czasie. W związku z powyższym dalszy opis analizy odpowiedzi układu będzie dotyczyć przedziału czasowego z przedziału czasu od 11 sekund do końca trwania symulacji.

Dla wyników symulacji prezentowanych w tabeli 2 obliczono wartość średniej arytmetycznej z wartości maksymalnej (x_{cmax} , m) i minimalnej (x_{cmin} , m) przebiegu, w celu obliczenia x_{cmid} , m – wartości osi rzędnej mierzonej względem wartości rzędnej 0 m. Wartość ta została przyjęta jako wartość osi rzędnej, względem której występują oscylacje w stanie ustalonym i w artykule definiuje się ją jako średnią wysokość składowej ustalonej przebiegu czasowego sieci jezdnej, mierzoną od przyjętego początkowego położenia sieci jezdnej. Ponadto obliczono również odchylenie wartości maksymalnej i minimalnej przebiegu od x_{cmid} . Wyniki obliczeń prezentuje tabela 5.

Tab. 5. Wyniki obliczeń przeprowadzonych na podstawie rezultatów przedstawionych w tabeli 2

Tab. 5. The results of calculations carried out basing on the results listed in Table 2

Prędkość V_0	x_{cmin} , m	x_{cmax} , m	x_{cmid} , m	$x_{cmid} - x_{cmin}$, m	$x_{cmid} - x_{cmax}$, m
10 m/s	-0,25834	-0,23933	-0,24884	0,009504	-0,0095039
20 m/s	-0,26027	-0,23663	-0,24845	0,011819	-0,011819
30 m/s	-0,26248	-0,23324	-0,24786	0,014618	-0,014618

Tabela 6 przedstawia wyniki analogicznych obliczeń jak w tabeli 5 dla przebiegów prędkości pionowych $V_c = dx_c(t)/dt$. Wielkości V_{cmin} , V_{cmax} , V_{cmid} zdefiniowano jako: V_{cmin} – minimalna wartość składowej ustalonej przebiegu czasowego prędkości pionowej sieci jezdnej, mierzoną od przyjętego położenia początkowego, V_{cmax} – maksymalna wartość składowej ustalonej przebiegu czasowego prędkości pionowej sieci jezdnej, mierzoną od przyjętego położenia początkowego, V_{cmid} – średnią prędkość pionową składowej ustalonej sieci jezdnej, mierzoną od przyjętego położenia początkowego.

Tab. 6. Wyniki obliczeń przeprowadzonych na podstawie rezultatów przedstawionych w tabeli 4

Tab. 6. The results of calculations carried out basing on the results listed in Table 4

Prędkość V_0	V_{cmin} , m/s	V_{cmax} , m/s	V_{cmid} , m/s	$V_{cmid} - V_{cmin}$, m/s	$V_{cmid} - V_{cmax}$, m/s
10 m/s	-0,00933	0,00998	0,000323	0,009656	-0,009656
20 m/s	-0,03039	0,02774	-0,001325	0,029061	-0,029061
30 m/s	-0,04188	0,06867	0,013394	0,055278	-0,055278

Analizując wyniki otrzymane w tabeli 6 stwierdza się, że wartość średnia prędkości pionowej znajdują się w okolicach 0 m/s dla badanych prędkości V_0 . Natomiast zauważalny jest wzrost bezwzględnej wartości maksymalnego odchylenia prędkości pionowej od wartości średniej tej prędkości wraz ze wzrostem prędkości V_0 . Na uwagę zasługuje również fakt równości co do wartości bezwzględnej różnicy odchylenia $V_{cmid} - V_{cmin}$ i $V_{cmid} - V_{cmax}$.

Należy zaznaczyć, że rezultaty symulacji są wynikami wstępnymi badań wpływu współpracy układu odbierak prądu – sieć trakcyjna i nie zostały zweryfikowane w rzeczywistych warunkach. Badania wymagają dalszych prac i analiz.

Serdeczne podziękowania dla Pana mgr inż. Arkadiusz Dudy z Wydziału Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Zakładu Automatyki Napędów i Energoelektroniki, za implementację modelu układu pantograf – sieć trakcyjna w środowisku Matlab.

5. Literatura

- [1] Jagiełło A. St., Dudzik M.: Dynamiczne aspekty współpracy odbierak prądu - sieć trakcyjna, Materiały konferencyjne XV Ogólnopolska Konferencja Naukowa Trakcji Elektrycznej SEMTRAK 2012.
- [2] Kobielski A.: O pewnym aspekcie modelowania układu drgającego odbierak prądu-sieć trakcyjna, XIV Warsztaty Naukowe PTASK.
- [3] Kobielski A.: Wyznaczenie wpływu parametrów mechanicznych układu odbierak prądu – sieć trakcyjna na jego własności dynamiczne metodami symulacji komputerowej, Praca Doktorska, Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny, Kraków 1982.
- [4] Kumaniecka A.: Metody analizy drgań układów dyskretno-ciągłych i ich zastosowanie do problemów transportu szynowego, Wydawnictwo PK, Kraków 2007.
- [5] Pisano A., Elio U.: Contact force estimation and regulation in active pantographs: an algebraic observability approach, 46th IEEE Conference on Decision and Control, New Orleans, LA, USA, Dec. 12-14, 2007.
- [6] Pisano A., Elio U.: Contact force regulation in wire-actuated pantographs via variable structure control and frequency-domain techniques, International Journal of Control, Vol. 00, No. 00, 1-20, January 2006.
- [7] Roman Z.: Symulacja współpracy odbieraka prądu z siecią trakcyjną, TTS 7-8/2001.
- [8] Siemiński T. Jarosz T.: Odbieraki prądu i ich współpraca z siecią jezdnią, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Wydanie trzecie zmienione, Warszawa 1993.