

ANALIZA WPLYWU ODLEGŁOŚCI MIĘDZY PANTOGRAFAMI NA DRGANIA KOLEJOWEJ SIECI TRAKCYJNEJ¹

Danuta BRYJA, Adam POPIOLEK

Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego

W artykule przedstawiono wyniki kolejnego etapu badań dynamiki kolejowej sieci trakcyjnej obciążonej ruchem pantografów, wykonywanych za pomocą autorskiej metody symulacji drgań sprzężonego układu pantografy – sieć trakcyjna. Przeanalizowano wpływ prędkości ruchu oraz odległości pomiędzy pantografami na drgania przewodu jezdny oraz na siłę nacisku stykowego ślizgacza pantografu na przewód jezdny. Do analiz wybrano trzy rozstawy pantografów oraz pięć prędkości. Przeanalizowano charakter zjawiska na podstawie przebiegów czasowych wielkości wyjściowych oraz miar statystycznych. Zidentyfikowano możliwość wystąpienia niekorzystnych kombinacji warunków obciążenia sieci, skutkujących zwiększeniem niekorzystnych zjawisk dynamicznych. Sformułowano wnioski do dalszych badań.

Słowa kluczowe: symulacja drgań, drgania przewodu jezdny, siła nacisku stykowego, interakcja sieć jezdna – pantografy.

1. WPROWADZENIE

Badania interakcji dynamicznej pomiędzy górną siecią jezdnią trakcji elektrycznej a poruszającymi się po niej pantografami stały się obiektem zainteresowania branży kolejowej na całym świecie wraz z rozwojem kolei dużych prędkości. Na obszarze Unii Europejskiej dodatkowym czynnikiem jest konieczność przeprowadzania ocen zgodności z wymogami interoperacyjności, wprowadzona przez Dyrektywę [4] oraz Techniczne Specyfikacje Interoperacyjności [7]. Sieć trakcyjna jest składnikiem interoperacyjności podsystemu "Energia", a jej tzw. charakterystyka dynamiczna jest jednym z podstawowych parametrów określających ten podsystem.

Prace badawcze w zakresie dynamiki sieci trakcyjnych, pantografów oraz interakcji między nimi obejmują zarówno badania eksperymentalne, jak i numeryczne. Procedura oceny sieci jako składnika interoperacyjności według TSI wykorzystuje oba rodzaje analizy. Ocenę należy wykonywać w dwóch krokach: najpierw za pomocą symulacji numerycznej, a następnie, jeśli wyniki symulacji mieszczą się w określonych granicach, wykonując próbę dynamiczną w terenie. Narzędzie obli-

¹ DOI 10.21008/j.1897-4007.2017.25.06

czenia powinno umożliwiać uzyskanie wartości maksymalnej oraz miar statystycznych siły nacisku stykowego ślizgacza pantografu na przewód jezdny (wartości średniej, odchylenia standardowego), uniesienia przewodu jezdnego w miejscach podwieszenia sieci jezdnej do konstrukcji wsporczych oraz procentowego udziału czasu, w którym nastąpiła utrata kontaktu ślizgacza z przewodem jezdny. Narzędzie obliczeniowe powinno umożliwiać przeprowadzenie symulacji drgań przy obciążeniu sieci jednym pantografem oraz dwoma pantografami w różnych odległościach i z różnymi prędkościami. Powinno także zostać poddane walidacji zgodnie z wymaganiami normy EN50318 [5].

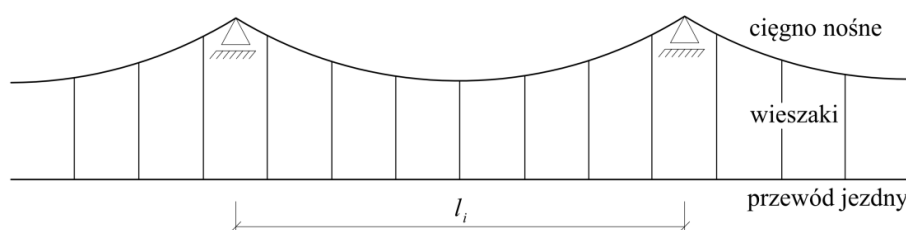
Specyfika wymagań TSI oraz normy EN50318 sprawia, że wciąż prowadzone są badania nad metodami symulacji spełniającymi te wytyczne. Przegląd stosowanych na świecie metod modelowania układu dynamicznego pantograf – sieć trakcyjna autorzy przedstawili w pracy [1]. Podjęli też działania mające na celu opracowanie metody symulacyjnej spełniającej wymogi TSI, bazującej na autorskim, dyskretno-ciągłym modelu obliczeniowym sprzężonego układu pantografy – sieć trakcyjna. Oryginalną cechą modelu jest konsekwentne zastosowanie teorii cięga do modelowania liny nośnej oraz przewodu jezdnego sieci górnej, zgodnie z naturą ich pracy. Na obecnym etapie badań sieć składa się z jednego przewodu jezdnego oraz jednej liny nośnej. Uwzględniono nieliniowe zachowanie wieszaków, polegające na nieprzenoszeniu ściskania. Szczegółowy opis modelu obliczeniowego z wyprowadzeniem równań ruchu oraz metodę ich rozwiązywania zaprezentowano w pracach [1], [2] i [3]. Przy pomocy narzędzia symulacyjnego wykonano analizę wpływu tłumienia w materiale liny nośnej i przewodu jezdnego na wyniki symulacji, której wyniki zaprezentowano w pracy [1] oraz przeprowadzono wstępną walidację metody symulacyjnej [2] zgodnie z normą EN50318 [5].

W niniejszym artykule pokazano wyniki analizy drgań sieci trakcyjnej obciążonej przejazdem dwóch pantografów. Analiza taka jest wymagana przez TSI, ponieważ odwzorowuje typową sytuację eksploatacyjną, która może występować na liniach kolejowych wszystkich kategorii i przy każdym rodzaju ruchu – od linii lokalnych po linie dużych prędkości, zarówno w ruchu pasażerskim, jak i towarowym. Badania w tym zakresie są rzadko opisywane w literaturze, chociaż ich wyniki, a także obserwacje prowadzone w czasie eksploatacji, pokazują, że dynamiczne wpływy obciążenia dwoma pantografami mogą być istotne. Pombo i in. [6] pokazali, że w przypadku drugiego odbieraka istotnie rośnie siła nacisku stykowego oraz pojawiają się liczne przypadki utraty kontaktu ślizgacza pantografu z przewodem jezdny.

W pierwszej części artykułu opisano założenia modelu obliczeniowego oraz zakres przeprowadzonej analizy. Następnie pokazano wyniki symulacji przeprowadzonej przy różnych prędkościach ruchu oraz różnych odległościach pomiędzy dwoma pantografami, w postaci przebiegów drgań przewodu jezdnego oraz przebiegów zmian siły nacisku stykowego ślizgacza pantografu na przewód jezdny. Na ich podstawie sformułowano wnioski i określono kierunek dalszych badań.

2. ZAŁOŻENIA MODELU UKŁADU SIEĆ TRAKCYJNA – PANTOGRAFY

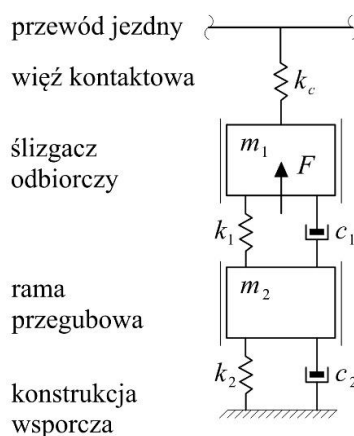
Model układu dynamicznego sieć trakcyjna – pantografy składa się trzech sprzężonych podukładów: górnej sieci jezdnej oraz dwóch pantografów. Sieć jezdna składa się z jednego przewodu jezdnej i jednej liny nośnej. Elementy te modelowane są z wykorzystaniem teorii wiotkiego cięgna i metody aproksymacyjnej Lagrange'a-Ritza. Lina nośna reprezentowana jest przez liniowo-sprężyste, wieloprzęsłowe cięgno, oparte na podporach w miejscach występowania konstrukcji wsporczych sieci (zwanymi dalej wspornikami). Statyczna krzywa zwisu cięgna między podporami jest paraboliczna. Przewód jezdny, modelowany za pomocą liniowo-sprężystej struny, jest podwieszony do liny nośnej za pomocą więzi sprężystych, których sztywność jest niezerowa przy rozciąganiu, natomiast zerowa przy ściskaniu, co odwzorowuje rzeczywisty charakter pracy wieszaków (rys. 1). Sposób uwzględnienia takiego zachowania wieszaków w metodzie symulacyjnej opisano szczegółowo w pracy [1], wraz ze stosowną modyfikacją układu równań ruchu wyprowadzonych w [3].



Rys. 1. Schemat górnej sieci jezdnej

Model sieci jezdnej wymaga określenia parametrów fizycznych, takich jak sztywność osiowa liny nośnej, wstępne naciągi liny nośnej i przewodu jezdnej oraz masa jednostkowa. Wymaga także określenia parametrów tłumienia materiałowego, którego miarą jest czas retardacji. Podaje się go osobno dla materiału, z którego wykonana jest lina nośna oraz materiału przewodu jezdnej, wiążąc podstawowe częstotliwości własne liny i przewodu z zadanymi liczbami tłumienia.

Pantografy modelowane są jako układy dyskretne o dwóch stopniach swobody, w których elementy masowe reprezentują ślizgacz odbiorczy oraz ramę przegubową pantografu. Elementy masowe są połączone za pomocą więzi sprężystych i tłumiących. Model pantografu wymaga określenia zastępczych mas poszczególnych elementów oraz parametrów sztywności i tłumienia łączących ich więzi (rys. 2). Rozstaw pantografów oraz prędkość ich przejazdu są stałe.



Rys. 2. Model dynamiczny pantografu (k_c – sztywność więzi kontaktowej, k_1, k_2 – sztywności więzi sprężystych łączących masy m_1, m_2 elementów pantografu, c_1, c_2 – parametry tłumienia tłumików wiskotycznych, F – statyczna siła nacisku)

Drgania sieci trakcyjnej i pantografów są sprzężone poprzez siły wzajemnego oddziaływania między tymi podukładami. Siły te są reakcjami sprężystych więzi kontaktowych, które modelują styk między każdym pantografem i przewodem jezdny (por. rys. 2). Więź kontaktowa nie jest fizycznym elementem występującym na styku podukładów, ale jej stosowanie jest dopuszczone w tego typu modelach, m.in. przez normę [5]. Charakterystyką więzi kontaktowej jest jej sztywność.

3. DANE OBLICZENIOWE BADANEGO ODCINKA SIECI

W tabeli 1 zestawiono przyjęte do obliczeń parametry fizyczne modelu układu sieć trakcyjna – pantografy. Parametry te w większości pochodzą z tzw. modelu odniesienia zdefiniowanego w normie [5], pozostałe przyjęto na podstawie danych literaturowych – parametry tłumienia i sztywność osiową liny nośnej. Założono mały poziom tłumienia zarówno w materiale liny nośnej jak i przewodu jezdny, z liczbą tłumienia o wartości 0,5%, co jest zgodne z informacjami literaturowymi [6]. Na podstawie wcześniej wykonanych testów metody obliczeniowej przyjęto krok całkowania numerycznego równań ruchu 0.001 s, oraz bazową liczbę funkcji aproksymacyjnych $n = 20$, która dotyczy jednego kierunku przemieszczeń w obrębie jednego przęsła (por. [1], [2]).

Założono, że badany odcinek sieci składa się z pięciu przęseł. Jak wynika z wcześniejszych badań, przyjęcie tak krótkiego odcinka testowego nie zapewnia dostatecznej dokładności wyników symulacji w analizie ilościowej, jest jednak wystarczające do przeprowadzenia jakościowych analiz zachowania dynamicznego sieci, co potwierdzają też inni autorzy [6].

Tab. 1. Zestawienie parametrów fizycznych modelu sieci oraz pantografów

Parametr	Wartość	Parametr	Wartość
Masa jednostkowa liny nośnej	1,07 kg/m	Siła nacisku statycznego pantografu	120 N
Naciąg liny nośnej	16 kN	Siła aerodynamiczna	0 N
Sztywność osiowa liny nośnej	12 MN	Masa ślizgacza pantografu	7,2 kg
Masa jednostkowa przewodu jezdnego	1,35 kg/m	Masa ramy pantografu	15,0 kg
Naciąg przewodu jezdnego	20 kN	Sztywność górnej sprężyny pantografu (k_1)	4 200 N/m
Sztywność wieszaka przy rozciąganiu	100 kN/m	Sztywność dolnej sprężyny pantografu (k_2)	50 N/m
Długość przęsła	60 m	Parametr górnego tłumika pantografu (c_1)	10 Ns/m
Liczba przęseł	5	Parametr dolnego tłumika pantografu (c_2)	90 Ns/m
Liczba wieszaków w przęsle	9	Sztywność sprężyny kontaktowej (k_c)	50 kN/m
Liczba tłumienia liny nośnej	0,5%	Liczba tłumienia przewodu jezdnego	0,5%

Sieć obciążona jest ruchem dwóch pantografów o jednakowych parametrach. Pantografy poruszają się ze stałą prędkością v w stałej odległości d od siebie. Analizy numeryczne przeprowadzono wariantując prędkość pantografów oraz odległość między nimi. Przyjęto pięć różnych prędkości, które są często stosowane w kolejnictwie jako wartości graniczne przy projektowaniu elementów infrastruktury i pojazdów: 120 km/h, 160 km/h, 200 km/h, 250 km/h i 300 km/h. Rozważono trzy rozstawy pantografów: 40 m, 100 m i 200 m. W większości odpowiadają one spotykanym w praktyce eksploatacyjnej sytuacjom, w których w trakcji podwójnej poruszają się lokomotywy lub elektryczne zespoły trakcyjne. Niektóre z analizowanych sytuacji nie występują w praktyce (np. ruch dwóch pantografów w rozstawie 40 m z prędkościami rzędu 200 km/h i więcej), ale zostały uwzględnione w celach poznawczych.

4. WYNIKI SYMULACJI

W niniejszym punkcie przedstawiono wyniki symulacji oraz wynikające z nich wnioski. Przeanalizowano drgania (przemieszczenia) pionowe przewodu jezdnego na lewym wsporniku środkowego (trzeciego) przęsła analizowanego odcinka sieci oraz siłę nacisku stykowego ślizgacza pantografu na przewód jezdny wraz z jej miarami statystycznymi w czasie przejazdu pantografów przez trzecie przęsło. Na rysunkach

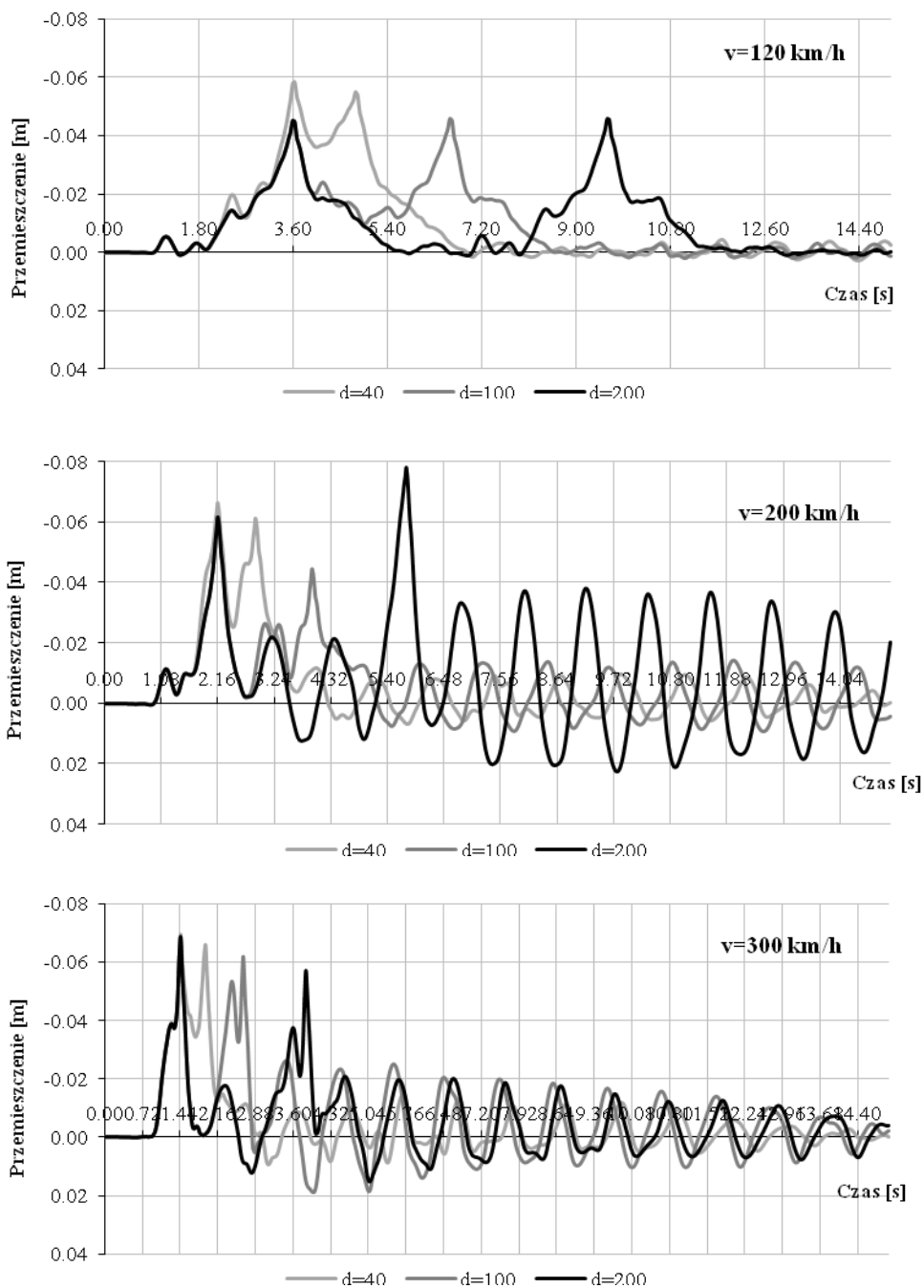
3 i 4 pokazano przebiegi wielkości wynikowych dla wybranych prędkości przejazdu pantografów (120 km/h, 200 km/h i 300 km/h), natomiast w tabeli 2 zestawiono wyniki dla wszystkich prędkości, dla których przeprowadzono symulacje.

Tab. 2. Zestawienie wartości liczbowych i miar statycznych analizowanych wielkości wyznaczonych podczas przejazdu pierwszego i drugiego pantografu przez środkowe przęsło (w – uniesienie przewodu jezdnego na lewym wsporniku przęsła, F_m – średnia siła nacisku stykowego, σ – odchylenie standardowe siły nacisku stykowego, F_{max} , F_{min} – maksymalna i minimalna wartość siły nacisku stykowego)

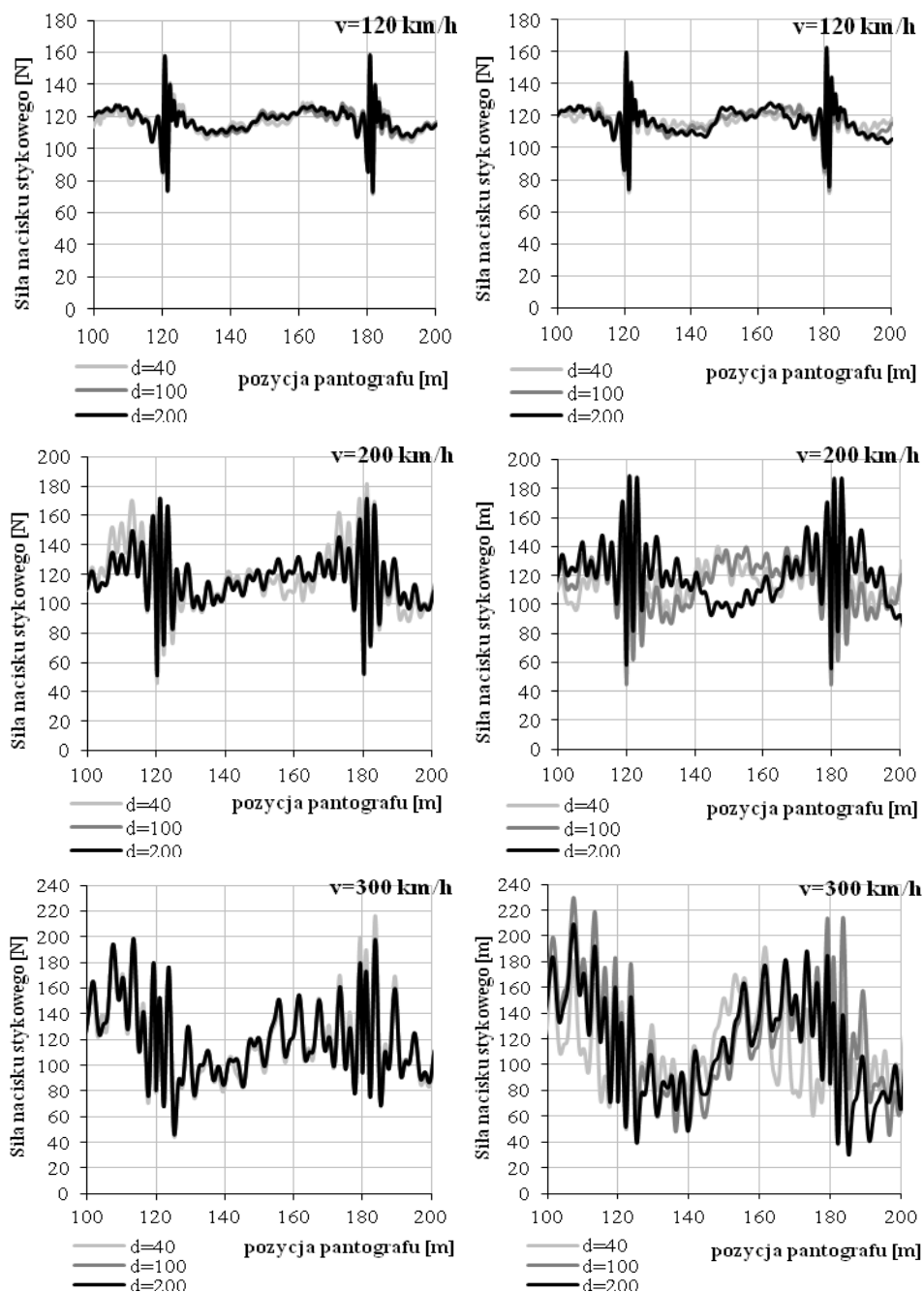
d	Pierwszy pantograf					Drugi pantograf				
	w	F_m	σ	F_{max}	F_{min}	w	F_m	σ	F_{max}	F_{min}
[m]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[N]	[mm]	[N]	[N]	[N]	[N]
$v = 120 \text{ km/h}$										
40	58,2	117,2	8,0	156,1	74,3	54,8	116,9	7,1	154,8	71,6
100	44,9	117,7	8,0	157,6	73,6	45,6	117,4	8,2	158,7	73,8
200	45,0	117,5	7,8	157,5	73,6	45,7	117,4	8,4	159,9	74,4
$v = 160 \text{ km/h}$										
40	54,3	116,1	13,0	165,7	61,7	66,7	116,6	11,3	161,7	59,3
100	49,4	117,0	12,2	164,2	63,4	60,2	116,9	12,3	162,4	65,3
200	49,4	116,6	11,9	164,0	63,3	50,5	116,5	11,8	153,5	61,6
$v = 200 \text{ km/h}$										
40	66,1	116,3	17,8	171,8	46,1	61,0	116,8	15,8	165,4	50,2
100	61,7	117,5	15,0	172,0	51,5	44,6	116,9	18,1	150,9	45,0
200	61,7	117,6	15,2	172,0	51,5	78,1	118,0	19,5	189,1	55,8
$v = 250 \text{ km/h}$										
40	76,9	119,9	23,1	195,3	48,9	68,7	117,7	19,9	177,8	55,1
100	61,3	117,9	20,0	183,0	56,2	56,1	117,7	29,0	179,5	59,2
200	61,4	117,8	20,1	183,0	56,5	62,9	116,9	17,6	163,9	56,7
$v = 300 \text{ km/h}$										
40	68,4	111,1	25,0	199,8	43,7	65,7	112,8	32,1	191,6	49,7
100	68,0	112,5	23,3	179,6	45,5	61,0	111,6	35,6	214,1	47,8
200	68,0	112,4	23,3	179,6	45,5	56,1	114,2	35,0	188,0	39,4

Na podstawie otrzymanych wyników można sformułować szereg wniosków o charakterze poznawczym. Pierwsze z nich wynikają z analizy przebiegów pionowego przemieszczenia przewodu jezdnego na lewym wsporniku środkowego przęsła, przedstawionych na rysunku 3. Pionowe linie siatki wykresów odpowiadają chwilom, w których pierwszy pantograf przejeżdża przez kolejne wsporniki sieci. Wartości ujemne oznaczają uniesienie przewodu.

Na wykresie dotyczącym prędkości 120 km/h widać wyraźnie dwa duże piki w każdym z trzech prezentowanych przebiegów. Pierwszy pik występuje w chwili $t = 3,60 \text{ s}$, w której pierwszy pantograf przejeżdża przez badany wspornik. Drugi pik pojawia się, gdy przez wspornik przesuwają się drugi pantograf. Pik ten znajduje się w różnych odległościach od pierwszego z powodu różnych rozstawów pantografów.



Rys. 3. Przemieszczenie przewodu jezdnego na lewym wsporniku środkowego przęsła, w zależności od rozstawu pantografów i ich prędkości



Rys. 4. Siła nacisku stykowego pierwszego pantografu (lewa kolumna) i drugiego (prawa kolumna) w czasie przejazdu przez środkowe przęsło, w zależności od rozstawu pantografów i ich prędkości

Jak widać na rysunku 3, w przypadku większych rozstawów odbieraków ($d=100$ m i 200 m) wartość pierwszego pik odpowiedzi jest w przybliżeniu taka sama, co oznacza, że na jego wartość nie ma znaczącego wpływu drugi pantograf (przy największym rozstawie nie pojawił się on jeszcze nawet na odcinku testowym). Natomiast przy małym rozstawie ($d=40$ m) pik ten jest większy z powodu interakcji pomiędzy wpływem pierwszego i drugiego pantografu na drgania sieci.

Przy dużych rozstawach pantografów i umiarkowanych prędkościach jazdy (rzędu 120 km/h) uniesienie przewodu jezdnego na wsporniku przy przejeździe drugiego pantografu (drugi pik) jest praktycznie takie samo jak dla pierwszego odbieraka – interakcja wpływów dwóch pantografów jest pomijalna. Przy małym rozstawie pantografów drugi pik jest nawet mniejszy, co jest korzystne. Podobnie jest przy większych prędkościach przejazdu – drugi pik wykazuje tendencję do zmniejszania się w stosunku do pierwszego wraz ze wzrostem odległości między pantografami. Wyjątkiem jest przebieg wygenerowany przy prędkości 200 km/h i rozstawie 200 m. Można zauważyć, że w tym przypadku ujawniają się pomiędzy dwoma pikami drgania swobodne o znaczącej amplitudzie. Drgania te powodują wyraźne zwiększenie drugiego pik, czyli mają niekorzystny wpływ na uniesienie przewodu na wsporniku przy przejeździe drugiego pantografu i amplitudę drgań swobodnych po przejechaniu analizowanego przekroju przez oba odbieraki. Zjawisko takie zachodzi przy splocie niekorzystnych wartości prędkości przejazdu i rozstawu pantografów. W zakresie przeprowadzonej analizy wystąpiło ono tylko przy kombinacji prędkości pantografów 200 km/h z ich rozstawem 200 m. W pozostałych przypadkach pojawienie się drugiego pantografu na odcinku testowym zaburzyło rozwój drgań swobodnych i ich amplitudy są umiarkowane. Szczególnie przy dużych prędkościach, rzędu 300 km/h, drgania swobodne nie zdążą rozwinąć się przed pojawieniem się drugiego pantografu na tyle, aby spowodować zwiększenie drgań swobodnych po przejeździe drugiego pantografu przez badany przekrój.

Na rysunku 4. pokazano przebieg siły nacisku stykowego (siły kontaktowej) w czasie przejazdu pierwszego i drugiego pantografu przez środkowe przęsło analizowanego odcinka sieci oraz jego najbliższe otoczenie, obejmujące wsporniki na obu końcach analizowanego przęsła. Przebiegi pokazane są w zależności od pozycji pantografu na długości odcinka testowego. Ponadto, w tabeli 2 przedstawiono miary statystyczne siły nacisku stykowego (wartość średnią, odchylenie standardowe) oraz rzeczywiste wartości maksymalne i minimalne. Wartości te są wyznaczone na podstawie środkowego (w tym przypadku trzeciego) przęsła odcinka testowego (pozycja pantografu w zakresie 120÷180 m), co jest zgodne z metodyką określoną przez TSI [7] i normę [5]. Dodatkowo w tablicy 2 zamieszczono wartości oznaczone symbolem w , oznaczające uniesienie przewodu jezdnego na lewym wsporniku środkowego (trzeciego) przęsła, w chwili przejazdu przez to miejsce sieci odpowiednio pierwszego i drugiego pantografu.

Stwierdzono, że zmiana rozstawu pantografów generalnie nie wpływa znacząco na siłę nacisku stykowego pierwszego pantografu. Natomiast w przypadku drugiego pantografu widać wyraźne różnice w przebiegach siły nacisku, które rosną wraz ze

wzrostem prędkości. Można zauważyć, że lokalne amplitudy zmian siły nacisku stykowego drugiego pantografu zmniejszają się wraz z rosnącym rozstawem odbieraków, niezależnie od prędkości pantografów. Niemniej, przy największej prędkości (300 km/h) obserwuje się w przypadku drugiego pantografu zdecydowanie największe odchylenia standardowe siły kontaktowej i najmniejsze wartości siły minimalnej, co świadczy o tendencji do utraty kontaktu. Podobne zjawisko opisywał Pombo i in. w pracy [6].

5. PODSUMOWANIE

Analiza pełnych przebiegów wielkości charakteryzujących drgania kolejowej sieci trakcyjnej obciążonej ruchem dwóch pantografów umożliwia zrozumienie istoty dynamicznego zachowania się układu. Pozwala stwierdzić, że większy rozstaw pantografów jest generalnie bardziej korzystny w dużym zakresie prędkości, zarówno dla 120 km/h, jak i 300 km/h. Analiza wykazała jednak, że istnieją kombinacje parametrów obciążenia sieci (prędkości i odległości między pantografami), które niekorzystnie wpływają na drgania układu. W praktyce, wykonanie wielu symulacji dla konkretnej sieci umożliwia zidentyfikowanie wrażliwych kombinacji parametrów i podjęcie kroków mających przeciwdziałać negatywnym zjawiskom.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że w przypadku obciążenia sieci trakcyjnej ruchem dwóch pantografów wpływy dynamiczne zależą od pewnego wspólnego parametru łączącego prędkość jazdy z rozstawem odbieraków. Parametr ten powinien być dodatkowo powiązany z okresem drgań własnych sieci jezdnej i alternatywnie – samego przewodu jezdnej. Analiza wykazała bowiem, że możliwe jest pojawienie się specyficznych drgań swobodnych o znaczącej amplitudzie, pomiędzy przejazdem pierwszego i drugiego pantografu przez badany przekrój. Takie drgania, wykazujące cechy wzmocnienia rezonansowego, istotnie wpływają na zjawiska dynamiczne zachodzące na sieci trakcyjnej w czasie przejazdu pociągu. Można wstępnie stwierdzić, że niekorzystny wpływ drgań swobodnych ujawnia się, jeżeli odstęp czasowy pomiędzy pojawieniem się pantografów w określonym przekroju (tu 3,6 s) jest zbliżony do wielokrotności podstawowego okresu drgań własnych sieci jezdnej (tu $T = 1/f = 1/0,833 = 1,2$ s). Określenie powiązanego parametru charakteryzującego układ pantografy – sieć trakcyjna może stanowić kolejny etap badań.

LITERATURA

- [1] Bryja, D., Popiołek A., Analiza drgań wieszara ciągnowego jako modelu kolejowej sieci trakcyjnej obciążonej ruchem pantografów. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*. 2017, nr 2, s. 177-190.

- [2] Bryja D., Popiołek A., Wstępna walidacja metody symulacji oddziaływania dynamicznego pomiędzy pantografem a siecią jezdnią górną kolejowej trakcji elektrycznej. Przegląd Komunikacyjny. 2017, nr 6, s. 21-27.
- [3] Bryja D., Prokopowicz: D. Dyskretno-ciągły model obliczeniowy sprzężonego układu dynamicznego: pantograf - napowietrzna sieć trakcyjna. Przegląd Komunikacyjny. 2016, nr 5, s. 44-51.
- [4] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/797 z dnia 11 maja 2016 r. w sprawie interoperacyjności systemu kolei w Unii Europejskiej.
- [5] EN 50318: 2002, Zastosowania kolejowe - Systemy odbioru prądu - Walidacja symulacji oddziaływania dynamicznego pomiędzy pantografem a siecią jezdnią górną.
- [6] Pombo J., Ambrósio J., Environmental and track perturbations on multiple pantograph interaction with catenaries in high-speed trains. Computers and Structures. 2013, nr 124, s. 88-101.
- [7] Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1301/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu Energia systemu kolei w Unii.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF DISTANCE BETWEEN PANTOGRAPHS ON THE CATENARY VIBRATIONS

Summary

The article presents the results of the current stage of study on the catenary dynamics, based on the author's method of simulation of pantograph – catenary system vibrations. The influence of the speed of movement and the distance between pantographs on the vibration of contact wire and the contact force has been analyzed. Three pantographs' distances and five speeds were chosen for the analyzes. The nature of the phenomenon was analyzed on the basis of time histories of the output quantities and statistical measures. The possibility of unfavorable combinations of load conditions, leading to an increase of undesirable dynamic behavior, has been identified. Conclusions for further research have been formulated.

Keywords: vibration simulation, catenary vibrations, contact force, pantograph-catenary dynamic interaction.

Dane autorów:

Dr hab. inż. Danuta Bryja, prof. nadzw. PWR
Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Katedra Mostów i Kolei
e-mail: danuta.bryja@pwr.edu.pl
telefon: +48 71 320 2332

Mgr inż. Adam Popiołek
Politechnika Wroclawska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego
Katedra Mostów i Kolei
e-mail: adam.popiolek@pwr.edu.pl
telefon: +48 71 320 2895