

Wstępna walidacja metody symulacji oddziaływania dynamicznego pomiędzy pantografem a siecią jezdnią górną kolejowej trakcji elektrycznej

Initial validation of the method for simulating the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line



Danuta Bryja

dr hab. inż. prof. PWr

*Katedra Mostów i Kolei, Wydział
Budownictwa Lądowego i
Wodnego,
Politechnika Wroclawska*

danuta.bryja@pwr.edu.pl



Adam Popiołek

mgr inż.

*Katedra Mostów i Kolei, Wydział
Budownictwa Lądowego i
Wodnego,
Politechnika Wroclawska*

adam.popiolek@pwr.edu.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki wstępnej walidacji autorskiej metody numerycznej, służącej do symulacji oddziaływania dynamicznego pomiędzy pantografem a siecią jezdnią górną kolejowej trakcji elektrycznej. Przeprowadzono zgodnie z wytycznymi normy EN50318 pierwszy krok walidacji metody, polegający na porównaniu wyników symulacji z wartościami granicznymi podanymi w normie dla tzw. modelu odniesienia. Wyznaczono parametry charakterystyki dynamicznej sieci jezdnej, w rozumieniu TSI Energia, na podstawie symulacji drgań dziesięcioprzęsłowej sieci i pantografu oraz przebiegu zmian w czasie siły nacisku stykowego ślizgacza pantografu na przewód jezdny. Dane geometryczne i mechaniczne sieci i pantografu przyjęto według załącznika do normy EN50318. Wykazano, że część parametrów charakterystyki dynamicznej sieci, wymaganych do walidacji, mieści się w granicach normowych, a pozostałe są przekroczone nieznacznie. Na podstawie wyników przeprowadzonej analizy określono kierunek dalszych badań.

Słowa kluczowe: Sieć trakcyjna; Pantograf; Interakcja dynamiczna; Symulacja numeryczna; Walidacja metody symulacyjnej

Abstract: The paper presents the results of initial validation of the method for simulating the dynamic interaction between pantograph and overhead contact line. According to European Standard EN50318, the first step of validation was done, which consists of comparison of the simulation results with limit values given in European Standard for reference model. The dynamic behaviour characteristics, in terms of TSI ENE, were calculated from simulated vibrations of ten-span overhead contact line and pantograph, and the rate of contact force change in time. Geometrical and mechanical parameters of overhead contact line and pantograph were based on an annex to European Standard EN50318. It was proved, that part of the characteristics meet European Standard requirements and the other slightly exceed the limit values. Based on results of the analysis, the direction of further research was determined.

Keywords: Overhead contact line; Pantograph; Dynamic interaction; Numerical simulation; Validation of simulation method

W związku z intensywnym rozwojem kolei dużych prędkości, w wielu krajach na świecie poszukiwane są nowe rozwiązania techniczne w zakresie taboru oraz infrastruktury, które mają poprawić efektywność ekonomiczną transportu kolejowego, komfort podróżowania, niezawodność oraz bezpieczeństwo. Optymalizowane są też i modernizowane rozwiązania istniejące, w celu dostosowania do zwiększonych prędkości. Te działania związane z dążeniem do zwiększania prędkości ruchu pociągów spowodowały wzrost zainteresowania zagadnieniami dynamiki obiektów infrastruktury kolejowej, w tym dynamiką kolejowej sieci trakcyjnej. Górna sieć jezdna trakcji kolejowej stała się przedmiotem badań nie tylko elektroenergetyków, ale i specjalistów zajmujących się dynamiką konstrukcji.

Drugim silnym bodźcem rozwoju badań dynamiki sieci jezdnych jest prawo wprowadzone na obszarze Unii Europejskiej, które ma na celu wdrożenie zasad interoperacyjności w zakresie rynku kolejowego we Wspólnocie. Podobnie jak w innych obszarach gospodarki, ma ono doprowadzić do utworzenia jednolitego rynku z czterema podstawowymi swobodami: przepływu osób, kapitału, usług i towarów. W branży kolejowej szczególne znaczenie ma ostatnia z wymienionych swobód, dotycząca głównie wzajemnej akceptacji wyrobów, przy czym pod pojęciem produktów należy rozumieć nie tylko dobra ruchome (pojazdy i ich części), ale także infrastrukturę i jej elementy.

Wymogom interoperacyjności podlega cały rynek kolejowy w Unii Europejskiej, w zakresie nowych i moder-

nizowanych elementów [1]. W myśl Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/797 w sprawie interoperacyjności systemu kolei w Unii Europejskiej [2], system kolejowy został podzielony na podsystemy oraz składniki interoperacyjności. Wymagają one oceny zgodności z wymaganiami europejskimi, dokonywanej przez tzw. jednostki notyfikowane. Efektem jest wydanie certyfikatu weryfikacji WE, który dopuszcza podsystem lub składnik interoperacyjności do użytku.

Sieć trakcyjna jest elementem podsystemu Energia (ENE). Jest to jeden z tzw. podsystemów strukturalnych wchodzących w skład drogi kolejowej. Warunki techniczne, jakie muszą spełniać poszczególne elementy podsystemów, oraz opisy metod ich weryfikacji, zawarte są w Technicznych Specyfika-

cjach Interoperacyjności (TSI). Wymagania dotyczące podsystemu Energia zawarte są w TSI Energia [3] i dotyczą głównie parametrów układu zasilania trakcji elektrycznej, ale także geometrii sieci jezdnej, skrajni pantografu oraz tzw. charakterystyki dynamicznej i jakości odbioru prądu. Analiza charakterystyki dynamicznej (tj. oddziaływania dynamicznego pomiędzy pantografem a siecią jezdnią górną) leży w zakresie zainteresowań dynamiki konstrukcji, ponieważ jej weryfikacja odbywa się na podstawie oceny dynamicznej siły nacisku stykowego ślizgacza pantografu na przewód jezdny, wraz z jej miarami statystycznymi oraz oceny drgań elementów sieci i pantografów. Jakość odbioru prądu jest wyrażana przez tzw. procent utraty kontaktu, który określa udział czasu, w którym nastąpiła utrata kontaktu ślizgacza pantografu z przewodem jezdny, w całkowitym czasie przejazdu przez badany odcinek sieci.

Zgodnie z punktem 6.1.4.1 TSI Energia [3], ocena zgodności konstrukcji sieci jezdnej powinna być wykonana dwuetapowo. W pierwszym etapie należy wykonać symulacje numeryczne prowadzące do wyznaczenia charakterystyki dynamicznej sieci jezdnej. Następnie, w przypadku gdy wyniki symulacji mieszczą się w dopuszczalnych granicach, należy przeprowadzić próbę dynamiczną w terenie. Pierwszym istotnym problemem w tym procesie jest dostęp do odpowiedniego oprogramowania symulacyjnego, stąd w ostatnich latach prowadzone są badania naukowe ukierunkowane na poszukiwanie efektywnych modeli numerycznych i algorytmów obliczeniowych, które dawałyby wiarygodne wyniki symulacji przy akceptowalnym czasie jej wykonywania. Przegląd stosowanych na świecie metod modelowania sieci trakcyjnych i symulacji drgań sieci autorzy przedstawili w pracy [4], natomiast w pracy [5] sformułowali własny oryginalny model obliczeniowy sprzężonego układu dynamicznego sieci trakcyjna – pantograf, który w [4] wykorzystali do analizy drgań złożonego wieszaka ciągnowego modelującego sieć trakcyjną.

Przedmiotem tego artykułu jest wstępna walidacja metody symulacyjnej zaproponowanej w pracach [4] i [5]. Zgodnie z wymogami TSI Energia, walidacja narzędzia obliczeniowego

służącego do symulacji charakterystyki dynamicznej sieci trakcyjnej powinna być przeprowadzona według normy EN50318 [6], która przewiduje dwa kroki tej walidacji. W pierwszym kroku należy porównać wyniki uzyskane dla tzw. modelu odniesienia za pomocą „niesprawdzonej” metody symulacyjnej, z wartościami granicznymi określonymi przez normę [6]. Krok drugi polega na porównaniu wyników symulacji z wynikami pomiarów dynamicznych przeprowadzonych w terenie lub porównaniu z rezultatami uzyskanymi za pomocą innych metod symulacji, dopuszczonych do stosowania. W niniejszym artykule opisano badania numeryczne dotyczące pierwszego kroku walidacji.

W pracy przedstawiono przykład symulacji charakterystyki dynamicznej sieci jezdnej górnej, w rozumieniu TSI Energia, wykorzystując parametry sieci i pantografu specyfikujące model odniesienia opisany w normie EN50318 [6]. Scharakteryzowano sposób doboru pozostałych wielkości wejściowych, nieokreślonych przez normę. Wyniki symulacji porównano z podanymi w normie wartościami granicznymi, które nie powinny być przekroczone, aby wynik pierwszego kroku walidacji metody symulacyjnej był pozytywny. Należy tu podkreślić, że przedstawione w artykule wyniki walidacji nie są jeszcze ostateczne, ponieważ na obecnym etapie badań nie wykorzystano w pełni możliwości obliczeniowych algorytmu opisanego w pracach [4] i [5]. Wykazano jednak, że wstępne rezultaty obliczeń są bardzo zbliżone do oczekiwanych, co uzasadnia podjęcie dalszych badań prowadzących do pełnej walidacji proponowanej metody.

Metoda symulacji numerycznej drgań układu sieć trakcyjna – pantograf

Na podstawie metody symulacyjnej opisanej w pracy [4], bazującej na modelu obliczeniowym układu sieć trakcyjna – pantograf sformułowanym w [5], został opracowany autorski program komputerowy o nazwie „SiViPant”. Program napisano w ogólnie dostępnym środowisku programistycznym Dev-Pascal, ale można go łatwo zaimplementować do zintegrowanego środowiska Delphi. Program umożliwia sy-

mulację drgań sieci jezdnej i pantografu oraz siły nacisku ślizgacza pantografu na przewód jezdny (tzw. siły nacisku stykowego). Wyniki symulacji stanowią dyskretny zapis przebiegów czasowych analizowanych wielkości wynikowych, z zadanyim krokiem czasowym. Poprzez obróbkę numeryczną wyznaczonych przebiegów uzyskuje się wyjściowe parametry wymagane przez TSI [3] oraz normę [6], opisujące charakterystykę dynamiczną górnej sieci jezdnej.

Górna sieć jezdna w przyjętym modelu obliczeniowym sieci trakcyjnej składa się z jednej liny nośnej oraz jednego przewodu jezdnego, połączonych za pomocą wiotkich wieszaków typu przewodowego, tzn. nieprzenoszących ściskania (rys. 1). Do modelowania sieci trakcyjnej zastosowano teorię drgań wiotkiego ciężna i metodę aproksymacyjną Lagrange’a - Ritza. Modelem fizycznym liny nośnej jest liniowo-sprężyste ciężno wiotkie o ciągłym rozkładzie masy, oparte poziomo-przesuwnie na sztywnych podporach. Modelem przewodu jezdnego jest liniowo-sprężysta struna o masie rozłożonej w sposób ciągły. Wieszaki reprezentowane są przez więzi sprężyste o niezerowych sztywnościach przy rozciąganiu i zerowych przy ścisaniu. Uwzględnienie takiego zachowania wieszaków odbywa się przez dodanie składnika nieliniowego do macierzowego równania ruchu, które wyjściowo jest równaniem liniowym. Nieliniowy składnik równania kompensuje (zeruje) w globalnej macierzy sztywności układu te elementy, które w danym kroku obliczeniowym odpowiadają wieszakom ścisany. Wieszaków ścisanych poszukuje się przez porównanie przemieszczeń obu końców każdego z wieszaków. Mechanizm ten opisano szczegółowo w pracy [4], wraz z podaniem formuł matematycznych.

Należy tu zwrócić uwagę na fakt, że składnik kompensacyjny równania ruchu w przedstawionym algorytmie jest wyznaczany w każdym kroku obliczeniowym za pomocą iteracji prostej, której zakończenie powinno nastąpić po uzyskaniu żądanej dokładności rozwiązania. Na potrzeby badań numerycznych opisanych w niniejszej pracy, ograniczono liczbę iteracji do jednego kroku, aby skrócić czasy obliczeń na etapie wstępnej walidacji proponowa-

nej metody. Dokładniejsze analizy numeryczne będą przedmiotem kolejnej publikacji. Drgania górnej sieci jezdnej są wymuszone przemieszczającym się wzdłuż sieci pantografem poruszającym się ze stałą prędkością, lub zestawem dwóch pantografów. Przyjęto, że modelem dynamicznym pantografu jest układ dyskretny składający się z dwóch elementach masowych, reprezentujących ślizgacz odbiorczy i ramę przegubową. Elementy te połączone są za pomocą tłumików wiskotycznych i więzi sprężystych (rys. 2). Drgania sieci i pantografu są sprzężone poprzez tzw. sprężynę kontaktową umieszczoną pomiędzy ślizgaczem pantografu i przewodem jezdny, której zastosowanie w modelu jest dopuszczone przez normę [6].

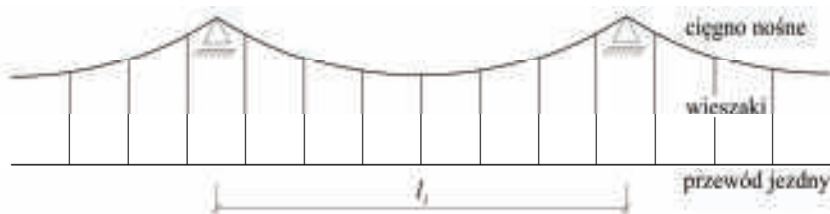
Wymagania normowe dotyczące pierwszego kroku walidacji metody obliczeniowej

Zgodnie z normą EN50318 [6], w pierwszym kroku walidacji metoda obliczeniowa powinna zostać poddana kontroli z wykorzystaniem tzw. modelu odniesienia. Walidacja polega na:

- wykonaniu dla modelu odniesienia symulacji oddziaływania dynamicznego między pantografem i górną siecią jezdnią, za pomocą proponowanej metody symulacyjnej,
- porównaniu wyników symulacji z wartościami granicznymi zawartymi w normie.

Metoda symulacyjna powinna umożliwiać wyznaczenie następujących danych wyjściowych, które stanowią zestaw wyników określających tzw. charakterystykę dynamiczną sieci trakcyjnej:

- wartość średnia siły nacisku stykowego F_m ,
- odchylenie standardowe siły nacisku stykowego σ ,
- statystyczna maksymalna i minimalna siła nacisku stykowego, wyznaczana ze wzorów $F_m + 3\sigma$ i $F_m - 3\sigma$,
- rzeczywista maksymalna i minimalna siła nacisku stykowego,
- rozkład statystyczny (histogram) siły nacisku stykowego,
- historia czasowa siły nacisku stykowego,
- maksymalne uniesienie przewodu jezdneho na wsporniku sieci,
- historia czasowa pionowego prze-



1. Schemat górnej sieci jezdnej

mieszczenia przewodu jezdneho w każdym specyficznym punkcie,

- maksymalne i minimalne pionowe przemieszczenie punktu kontaktu,
- historia czasowa pionowego przemieszczenia każdego punktu modelu pantografu,
- procent utraty kontaktu (między nakładką stykową pantografu i przewodem jezdny).

Sieć jezdna górna w modelu odniesienia jest zdefiniowana jako system nośny z jednym przewodem jezdny. Model składa się z dziesięciu identycznych przęseł. Analizie podlega piąte i szóste przęsło modelu sieci. Obliczenia należy wykonać dla jednego pantografu poruszającego się z prędkością 250 km/h i 300 km/h. Pochodzące z normy [6], wartości parametrów geometrycznych i mechanicznych modelu odniesienia (górną sieć jezdnej i pantografu) podano w tabeli 1. Graniczne wartości normowe, z którymi należy porównywać uzyskane wyniki symulacji są przedstawione w dalszej części artykułu, w tabeli z wynikami wstępnej walidacji metody obliczeniowej (tab. 2).

Określenie dodatkowych danych wejściowych symulacji

Zastosowana metoda obliczeniowa wymaga podania dodatkowych danych, które nie są określone przez normę [6]. Należą do nich niektóre parametry fizyczne układu pantograf – sieć trak-



2. Model dynamiczny pantografu

cyjna (sztywność osiowa linii nośnej, charakterystyka tłumienia linii nośnej i przewodu jezdneho) oraz parametry metody numerycznej (liczba funkcji bazowych zastosowanych do aproksymacji przemieszczeń, długość kroku całkowania numerycznego).

Sztywność osiową linii nośnej przyjęto na podstawie testu wpływu wartości tego parametru na wyniki obliczeń. Biorąc pod uwagę wartości charakterystyczne dla stosowanych w praktyce konstrukcji sieci jezdnych, założono, że moduł Younga zmienia się w zakresie 115÷130 GPa, jak dla miedzi Cu-ETP (jednego z typowych materiałów stosowanych do wykonywania lin nośnych), a przekroje linii przyjmują wartości z przedziału 65÷120 mm². W celu skrócenia czasu obliczeń testowych zredukowano długość modelu sieci do trzech przęseł. Test wykazał, że ponad 2,5-krotna zmiana sztywności (w zakresie 7,5÷19,5 MN) powoduje niewielkie zmiany uniesie-

Tab. 1. Charakterystyki modelu odniesienia definiowane przez normę [4]

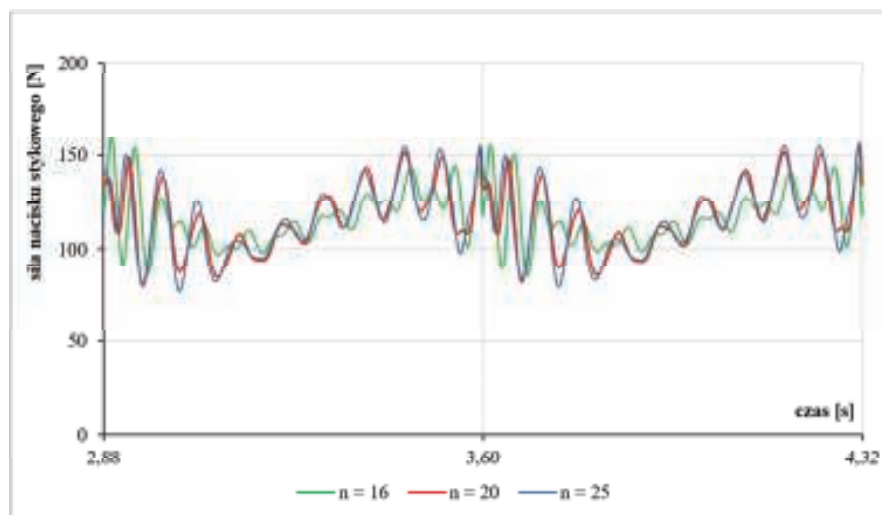
Masa jednostkowa linii nośnej	1,07 kg/m	Prędkości pantografu	250 km/h 300 km/h
Naciąg linii nośnej	16 kN	Masa ślizgacza pantografu	7,2 kg
Masa jednostkowa przewodu jezdneho	1,35 kg/m	Masa ramy pantografu	15,0 kg
Naciąg przewodu jezdneho	20 kN	Siła nacisku statycznego pantografu	120 N
Sztywność wieszaka przy rozciąganiu	100 kN/m	Sztywność górnej sprężyny pantografu (k_1)	4 200 N/m
Długość przęsła	60 m	Sztywność dolnej sprężyny pantografu (k_2)	50 N/m
Liczba przęseł	10	Parametr górnego tłumika pantografu (c_1)	10 Ns/m
Liczba wieszaków w przęsle	9	Parametr dolnego tłumika pantografu (c_2)	90 Ns/m
Statyczna siła nacisku stykowego (F)	120 N	Sztywność sprężyny kontaktowej (k_c)	50 kN/m
Siła aerodynamiczna	0 N	Liczba tłumienia przewodu jezdneho	0 %

Tab. 2. Porównanie wyników symulacji z granicznymi wartościami normowymi

	Wyniki obliczeń	Wg normy		Wyniki obliczeń	Wg normy	
		min	max		min	max
Prędkość pantografu [km/h]		250			300	
Srednia arytmetyczna siły nacisku stykowego [N]	116,1	110	120	116,2	110	120
Odczylenie standardowe siły nacisku stykowego [N]	31,0	26	31	39,8	32	40
Statystyczna maksymalna siły nacisku stykowego [N]	209,2	190	210	235,6	210	230
Statystyczna minimalna siły nacisku stykowego [N]	23,1	20	40	-3,2	-5	20
Rzeczywista maksymalna siła nacisku stykowego [N]	220,0	175	210	276,5	190	225
Rzeczywista minimalna siła nacisku stykowego [N]	20,2	50	75	-9,5	30	55
Procent utraty kontaktu [%]	0	0		0,35	0	
Maksymalne uniesienie na środkowym wsporniku sieci [mm]	71,1	48	55	74,4	55	65

Kolorem zielonym oznaczono wartości mieszczące się w granicach normowych.

Kolorem czerwonym oznaczono wartości przekraczające granice normowe.



3. Zmiany siły nacisku stykowego w czasie przejazdu pantografu przez piąte i szóste przęsło, w zależności od liczby funkcji bazowych zastosowanych do aproksymacji przemieszczeń

nia przewodu jezdnego na wsporniku sieci (do 10% wartości maksymalnej) i siły nacisku stykowego (do 4% wartości maksymalnej). Ostatecznie do dalszych obliczeń przyjęto sztywność osiową liny nośnej o wartości 12,0 MN.

Jednym z najistotniejszych zagadnień na etapie testowania metody symulacyjnej oraz doboru danych wejściowych okazało się określenie charakterystyk tłumienia. Jako miarę tłumienia w zastosowanym modelu obliczeniowym przyjęto liczbę tłumienia, określoną odrębnie dla liny nośnej i przewodu jezdnego, przy czym założono model tłumienia materiałowego, czyli tłumienie wynika z cech reologicznych materiału. Zagadnienie wpływu tłumienia (w materiale liny nośnej i przewodu jezdnego) na charaktery-

styki drgań wymuszonych sieci było szczegółowo analizowane w pracy [4]. Wnioski z tych analiz mogą być istotne w praktycznym wykorzystaniu metody symulacyjnej. Na etapie walidacji przyjęto natomiast, zgodnie w wytycznymi normy [6], że tłumienie w przewodzie jezdnym jest zerowe, podobnie jak tłumienie w lince nośnej, które nie jest określane przez normę.

Program komputerowy SiViPant wymaga również wprowadzenia danych wejściowych, które są parametrami metody numerycznej: liczby funkcji bazowych zastosowanych do aproksymacji przemieszczeń i długości kroku całkowania numerycznego. Ustalenie wartości tych parametrów zostało poprzedzone serią testów zbieżności rozwiązań, których wyniki pokazano na rys.

3-5. Do obliczeń testowych przyjęto prędkość pantografu równą 300 km/h.

Na rys. 3 i 4 przedstawiono zależność siły nacisku stykowego (rys. 3) oraz przemieszczenia przewodu jezdnego na środkowym wsporniku sieci (rys. 4) od liczby funkcji bazowych (sinusów) zastosowanych do aproksymacji przemieszczeń w jednym przęśle i w jednym kierunku – pionowym lub poziomym. Liczbę funkcji bazowych (n) wariantowano w trakcie testów w zakresie od 5 do 35, ale na rysunkach przedstawiono tylko trzy wybrane rozwiązania, których porównanie pokazuje, że zastosowanie 20-stu funkcji prowadzi do akceptowalnej dokładności rozwiązań. Dalsze zwiększanie liczby funkcji bazowych nie wpływa już znacząco na dokładność wyników, a powoduje znaczne wydłużenie czasu obliczeń, ponieważ liczba funkcji bazowych istotnie wpływa na rozmiar zadania, zatem i na jego złożoność obliczeniową. Całkowita liczba funkcji bazowych w zadaniu, przy aproksymacji przemieszczeń pionowych i poziomych liny nośnej oraz pionowych przewodu jezdnego, wynosi $3n \times$ liczba przęseł, czyli w analizowanym przypadku wynosi 600, gdy $n = 20$. Z uwagi na akceptowalny czas obliczeń oraz dokładność uzyskiwanych wyników, za optymalną liczbę funkcji bazowych do dalszych obliczeń przyjęto 20. Testy przeprowadzono w układzie tłumionym, o długości 10 przęseł. Na rys. 5 pokazano zależność siły nacisku stykowego od długości kroku całkowania numerycznego. Parametr ten wariantowano w zakresie $0,001 \div 0,00001$ s. Ze względu na bardzo dobrą zbieżność rozwiązań, do dalszych obliczeń można było przyjąć wartość $0,001$ s, korzystną ze względu na najkrótszy czas symulacji. Test ten wykonano na odcinku o długości trzech przęseł, prędkość pantografu wynosiła 300 km/h. Aby skrócić czas obliczeń, test ten wykonano dla liniowego modelu sieci, w którym wieszaki przenoszą zarówno rozciąganie, jak i ściskanie.

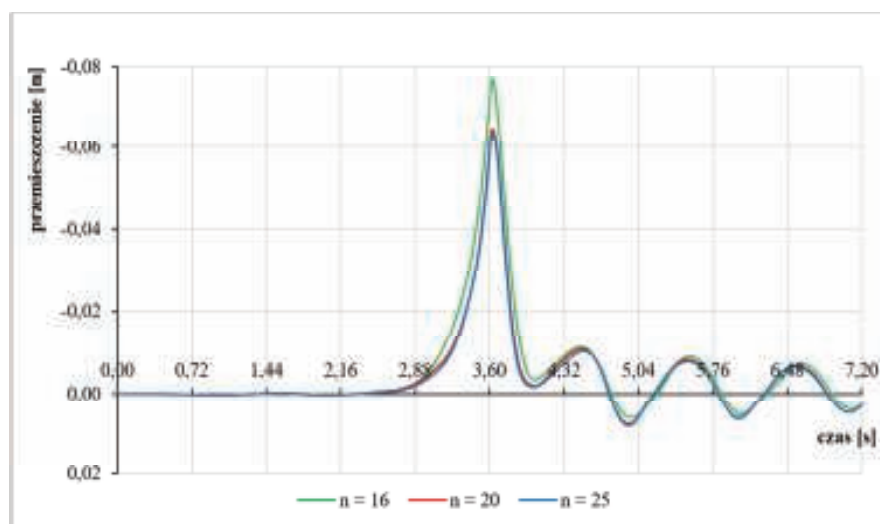
Wyniki wstępnej walidacji

W tabeli 2 zestawiono wynikowe wartości wielkości wyjściowych wymaganych przez normę [6], które zostały wyznaczone dla modelu odniesienia za pomocą proponowanej metody symulacyjnej. W tabeli pokazano wyniki

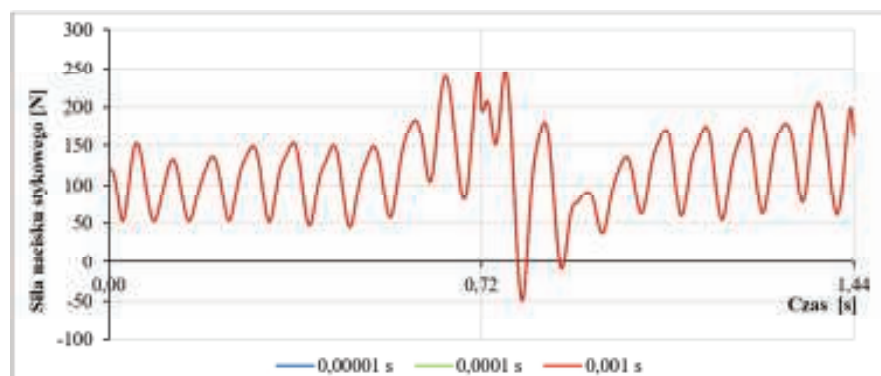
dla obu wymaganych prędkości ruchu pantografu: 250 km/h i 300 km/h i porównano je z granicami normowymi, w których powinny się mieścić wyniki symulacji wyznaczone metodą podlegającą walidacji. Kolorem zielonym oznaczono wartości mieszczące się w granicach normowych, natomiast kolorem czerwonym – wartości przekraczające granice normowe. Ocenę wyników przedstawionych w tabeli przeprowadzono na końcu pracy – w podsumowaniu.

Na rys. 6 porównano historie czasowe zmian siły nacisku stykowego podczas przejazdu pantografu przez piąte i szóste przęśło modelu sieci, wygenerowane przy dwóch prędkościach jazdy. Pokazane dwa przebiegi odniesiono do poziomu siły statycznej (120 N). Jak widać na rysunku, wzrost prędkości pantografu do 300 km/h powoduje wyraźne zwiększenie lokalnych pików siły nacisku stykowego, w porównaniu z prędkością 250 km/h. To zwiększenie pików lokalnych nie ma istotnego wpływu na wartość średnią siły, ale jak łatwo przewidzieć – skutkuje wzrostem odchylenia standardowego z 31 N do prawie 40 N (por. tabela 2).

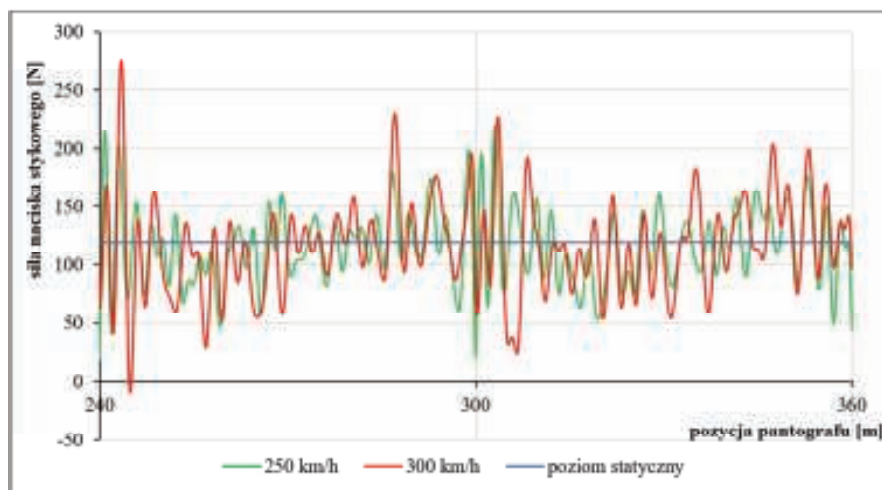
Obliczone miary statystyczne rozwiązania (wartość średnia i odchylenie standardowe) nie dają informacji na temat rozkładu prawdopodobieństwa siły nacisku stykowego (tj. częstości występowania poszczególnych wartości siły). Tę informację daje w przybliżeniu rozkład empiryczny w postaci histogramu. Na rys. 7 i 8 przedstawiono histogramy siły nacisku stykowego, wyznaczone na podstawie przebiegów czasowych pokazanych na rys. 6, które obejmują przejazd pantografu przez przęśła nr 5 i 6. Oś pionowa określa procentowy udział (w badanym przebiegu siły nacisku stykowego) tych wartości, które mieszczą się w kolejnych przedziałach na osi poziomej, przy czym przyjęto podział na przedziały co 5 N. Kształt histogramu wyznaczonego przy prędkości 250 km/h (rys. 7) pokazuje, że rozkład dynamicznej siły nacisku pantografu jest jednododalny, zbliżony do normalnego (gaussowskiego). Wartości siły skupiają się wokół wartości średniej (ok. 116 N), zbliżonej do poziomu statycznego (120 N). W przypadku prędkości większej (300 km/h), skupienie wartości siły nacisku stykowego wokół wartości średniej



4. Drgania przewodu jezdnego na środkowym wsporniku sieci (między przęśłem piątym i szóstym), w zależności od liczby funkcji bazowych zastosowanych do aproksymacji przemieszczeń



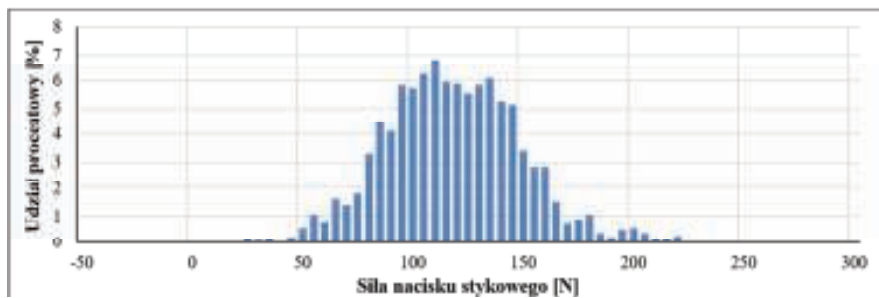
5. Zmiany siły nacisku stykowego w obrębie pierwszego i drugiego przęśła, w zależności od długości kroku całkowania numerycznego (trójprzęślowy model sieci)



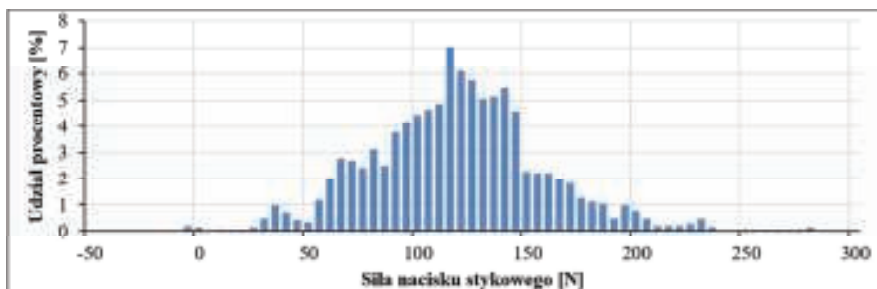
6. Historia czasowa siły nacisku stykowego podczas przejazdu przez piąte i szóste przęśło sieci przy różnych prędkościach ruchu pantografu

jest zdecydowanie mniejsze a rozkład trudno uznać za gaussowski (rys. 8). Na podstawie przedstawionych histogramów można w łatwy sposób wyznaczyć procent utraty kontaktu, zliczając częstość występowania wartości siły równej zero lub mniejszej i odnosząc ją do liczebności całego zbioru wartości.

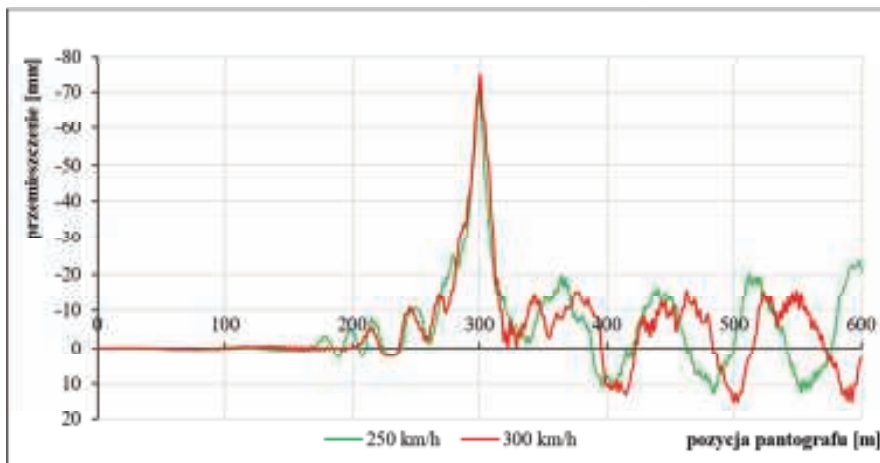
Na rys. 9 i 10 pokazano przykładowe wykresy drgań układu sieci trakcyjna – pantograf, wygenerowane dla dwóch rozważanych prędkości przemieszczania się pantografu wzdłuż sieci. Z przebiegów drgań mogą być odczytywane maksymalne i minimalne wartości przemieszczeń, a także może być określany



7. Histogram siły nacisku stykowego przy prędkości ruchu pantografu 250 km/h



8. Histogram siły nacisku stykowego przy prędkości ruchu pantografu 300 km/h



9. Historia czasowa pionowego przemieszczenia przewodu jezdnego na środkowym wsporniku sieci przy różnych prędkościach ruchu pantografu (wartości ujemne oznaczają uniesienie przewodu)

charakter drgań. Na przykład, na rys. 9 widoczne jest najpierw oscylacyjne narastanie uniesienia przewodu jezdnego do wartości maksymalnej, następnie, po przejeździe pantografu przez obserwowany punkt sieci, uniesienie szybko maleje a po oddaleniu się pantografu pojawiają się drgania swobodne. Punkt obserwacji drgań przewodu jest położony na wsporniku sieci (mówiąc ściślej, zgodnie z terminologią zastosowaną w TSI [3] – przy ramieniu odciągowym), między przęsłem piątym i szóstym. Wpływ prędkości ruchu pantografu na uniesienie przewodu jest generalnie mniejszy niż w przypadku siły nacisku stykowego.

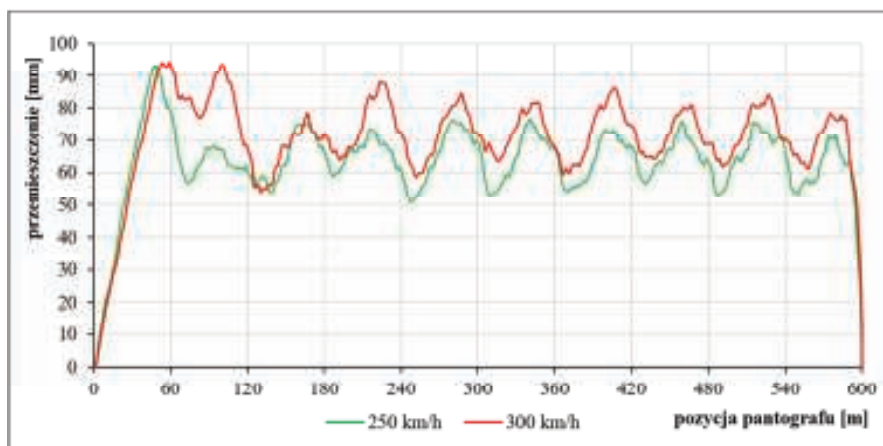
Rys. 10 pokazuje historię czasową pionowych drgań ślizgacza pantografu

w trakcie przejazdu przez cały dziesięcioprzęsłowy model sieci. Skrajne fragmenty pokazanych przebiegów obrazują odpowiednio – początkowy stan nieustalony będący skutkiem wjazdu pantografu na pierwsze przęsło i efekt końcowy wynikający ze zjazdu pantografu z ostatniego przęsła sieci. Oba te fragmenty są niepożądanym skutkiem przyjętego modelu obliczeniowego, w którym zakłada się, że końce przewodu jezdnego w przęsłach skrajnych są punktami stałymi oraz przemieszczenia dynamiczne elementów pantografu przed wjazdem na zestaw dziesięciu przęseł i po zjeździe są zerowe. Środkowe fragmenty wykresów (tj. pozycja pantografu między 240 m a 360 m) ilustrują przebieg drgań ślizgacza pan-

tografu przejeżdżającego przez piąte i szóste przęsło. Te przęsła, zgodnie z terminologią normy [6] stanowią „analizowany odcinek sieci”, czyli podzestaw całkowitej długości modelu sieci jezdnej górnej, na który nie mają wpływu początkowe stany nieustalone i efekty końcowe modelu. Jak wynika z rys. 10, jedynie w przybliżeniu można uznać, że drgania ślizgacza pantografu w obrębie analizowanego odcinka są już ustalone (powtarzalne). Należałoby rozważyć wydłużenie całkowitej długości modelu sieci.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono pierwszą próbę walidacji metody symulacyjnej zaproponowanej przez autorów w pracach [4] i [5]. Zaprezentowany w tablicy 2 zestaw wyników stanowi przykład wyznaczenia charakterystyki dynamicznej sieci jezdnej kolejowej trakcji elektrycznej, w rozumieniu TSI Energia. Możliwość uzyskania, na podstawie symulowanych drgań sieci, wielkości wyjściowych wymaganych przez TSI [3] oraz normę [6], świadczy o przydatności autorskiej metody obliczeniowej jako narzędzia do praktycznej oceny zgodności charakterystyki dynamicznej sieci z wymaganiami TSI. Z uwagi na fakt, że metoda obliczeniowa musi być poddana walidacji zgodnie z normą [6], porównano wyniki uzyskane przy zastosowaniu danych wejściowych tzw. modelu odniesienia, z granicami normowymi. Niektóre z uzyskanych wyników, głównie średnia siła nacisku stykowego, odchylenie standardowe czy statystyczna minimalna siła nacisku stykowego, mieszczą się w granicach normowych. W pozostałych przypadkach zakresy normowe przekroczone są nieznacznie. Można się spodziewać, że uwzględnienie większej liczby iteracji w procedurze wyznaczania nieliniowego składnika równania ruchu, kompensującego wpływ wieszaków ściskanych, doprowadzi do dokładniejszego wyznaczenia wielkości wyjściowych. Wpływ liczby iteracji w tej procedurze na wyniki symulacji zostanie przeanalizowany w kolejnym etapie badań. ◀



10. Historia czasowa przesunięcia ślizgacza przy różnych prędkościach ruchu pantografu

Materiały źródłowe

[1] Praca zbiorowa (red. Pawlik M.): Interoperacyjność systemu kolei Unii Europejskiej. Infrastruktura, sterowanie, energia, tabor. Kolejowa Oficyna Wydawnicza, 2015.

[2] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2016/797 z dnia 11 maja 2016 r. w sprawie interoperacyjności systemu kolei w Unii Europejskiej.

[3] Rozporządzenie Komisji (UE) nr 1301/2014 z dnia 18 listopada 2014

r. w sprawie technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu Energia systemu kolei w Unii.

[4] 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, JCEEA (praca przyjęta do druku).

[5] Bryja D., Prokopowicz: D. Dyskretno-ciągły model obliczeniowy sprzężonego układu dynamicznego: pantograf - napowietrzna sieć trakcyjna. Przegląd Komunikacyjny, 2016, nr 5, s. 44-51.

[6] Norma EN 50318: 2002, Zastosowania kolejowe - Systemy odbioru prądu - Walidacja symulacji oddziaływania dynamicznego pomiędzy pantografem a siecią jezdną górną.

REKLAMA

12. MIĘDZYNARODOWE TARGI KOLEJOWE

TRAKO

GDAŃSK
26-29.09.2017
amberexp^o

PATRONAT HONOROWY
MINISTER INFRASTRUKTURY I BUDOWNICTWA

GRUPA 

WWW.TRAKOTARGI.PL

WSPÓŁORGANIZACJA

BOMBARDIER
the evolution of mobility



KNORR-BREMSE



TINES



MEDCOM

WSPÓŁPRACA

unife

